

MECHANISCH GEDRAG VAN BRUGOPLEGGINGEN

VAN DE DINTELHAVENBRUG





Martijn de Boer 28-01-2011

Mechanisch gedrag van brugopleggingen

van de Dintelhavenbrug

MSc Afstudeerwerk

ter verkrijging van de graad van Master of Science aan de Technische Universiteit Delft, faculteit Civil Engineering and Geosciences

door

Martijn de Boer

Afstudeerkandidaat:

Martijn de Boer (1344536) CT5060 Afstudeerwerk Structural Engineering, Concrete Structures Civil Engineering, TU Delft 28-01-2011

Samenstelling afstudeercommissie:

Ir. C.P.M. Kuilboer Dr. Ing. J.S. Leendertz Prof. Dr. Ir. J.C. Walraven Dr. Ir. C. van der Veen Dr. Ir. M.A.N. Hendriks Ir. L.J.M. Houben Rijkswaterstaat / CT Rijkswaterstaat / SWI TU Delft / Structural and Building Engineering TU Delft / Structural and Building Engineering TU Delft / Structural Mechanics TU Delft / Road and Railway Engineering

VOORWOORD

Het onderzoek dat in deze scriptie is beschreven, is uitgevoerd bij Rijkswaterstaat, Dienst Infrastructuur, afdeling Civiele Techniek. Dit afstudeerverslag is geschreven voor het voltooien van de master Structural Engineering, specialisatie Concrete Structures, binnen de opleiding CIVIL Engineering aan de TU Delft.

Ten eerste wil ik de afdeling Civiele Techniek bedanken voor de gelegenheid die zij mij hebben gegeven om dit onderzoek uit te kunnen voeren. Speciale dank gaat hierbij uit naar ir. Cor Kuilboer voor de dagelijkse begeleiding en dr. ir. Ane de Boer voor zijn adviezen tijdens dit onderzoek van de afdeling Civiele Techniek. Tevens gaat speciale dank uit naar dr. Ing Han Leendertz, voorzitter van de normcommissie die nauw betrokken zijn bij het herschrijven van de normen voor brugopleggingen, voor zijn kennis en enthousiasme die hij aan mij over heeft weten te dragen.

Ten tweede wil ik alle personen die namens de faculteit Civiele Techniek en Geowetenschappen van de Technische Universiteit Delft deel uit hebben gemaakt van mijn afstudeercommissie, bedanken voor hun adviezen en kritisch oordeel gedurende het onderzoek. Speciale dank gaat hierbij uit naar mijn eerste begeleider dr. Ir. Cor van der Veen en voorzitter van de afstudeercommissie Prof. Dr. Ir. Joost Walraven.

Martijn de Boer

Landsmeer, januari 2011

SAMENVATTING

Nieuwe en huidige materialen voor opleggingen worden onderworpen aan tests zoals beschreven in de Europese voorschriften (NEN-EN 1337). Met deze huidige tests worden materialen niet getoetst op het verwerken van krachten, verplaatsingen en rotaties zoals deze in de praktijk voorkomen. Om een kritisch oordeel te kunnen geven over de huidige tests, zijn de variabele belasting- en bewegingsgeschiedenis van brugopleggingen van een betonnen brug, de Dintelhavenbrug, in kaart gebracht.

De belasting- en bewegingsgeschiedenis van de brugopleggingen van de Dintelhavenbrug zijn in kaart gebracht, met behulp van een eindige elementen model. In dit model zijn verkeersbelastingen en thermische belastingen opgenomen. De verkeersbelastingen komen voort uit een vermoeiingsmodel met 12 vrachtwagentypen, gebaseerd op de Europese voorschriften voor verkeersbelastingen (NEN-EN 1991-2) en metingen van verkeer op de Moerdijkbrug. De thermische belastingen volgen uit de Europese voorschriften (NEN-EN 1991-1-5). Voor beide (statische) belastingtypen is vastgesteld welke krachten, verplaatsingen, rotaties en slijtwegen een oplegging tijdens zijn levensduur te verwerken krijgt. Deze resultaten zijn vergeleken met de waarden die opgenomen zijn in de huidige tests van NEN-EN 1337 Deel 2: Glijdelen en NEN-EN 1337 Deel 5: Potopleggingen.

Uit de vergelijking van de tests met de resultaten die volgen uit het eindige elementen model en uit een uitgebreide analyse van het model kan worden geconcludeerd dat:

- het onduidelijk is wat de relatie is tussen de waarde van de slijtwegen die in de tests zijn vermeld en een tijdsduur (1jaar of levensduur van 10 tot 25jaar)
- een groot aantal waarden die bepaald zijn met behulp van het eindige elementen model van de Dintelhavenbrug qua orde grootte overeen komen met de waarden die opgenomen zijn in de tests
- voor snelheden waarmee verplaatsingen optreden verder onderzoek is vereist
- voor het werkelijk verloop van horizontale krachten en daarmee samenhangend, het wel of niet aanliggen van de geleidingen, verder onderzoek is vereist
- volgafstanden van vrachtwagens en het aantal vrachtwagens dat zich op hetzelfde tijdstip op de brug bevinden, grote invloed blijken te hebben op de slijtweg van een oplegging

Voor verder onderzoek wordt aanbevolen om:

- metingen uit te voeren aan de opleggingen van de Dintelhavenbrug
- dynamische analyses uit te voeren om dynamische vergrotingsfactoren vast te kunnen stellen
- dynamische analyses uit te voeren om wrijving in de opleggingen op een nauwkeurigere wijze in rekening te kunnen brengen
- verkeerssimulaties uit te voeren om inzicht te krijgen in volgafstanden van vrachtwagens en aantal vrachtwagens dat zich op hetzelfde tijdstip op een brug bevinden

INHOUDSOPGAVE

VOORWOORD	I
SAMENVATTING	ш
INHOUDSOPGAVE	v
1. INTRODUCTIE	1
1.1. Probleemstelling 1.2. Doelstelling 1.3. Aanpak	1 1 2
2. DINTELHAVENBRUG	3
 2.1. LOCATIE 2.2. GEOMETRIE 2.3. MATERIAALEIGENSCHAPPEN 2.4. RIJBAAN INDELING 2.5. OPLEGGINGEN 	3 4 5 6 7
3. OPLEGGINGEN	9
 3.1. Algemeen 3.2. Glijoplegging 3.3. Potoplegging 3.4. Bolsegment oplegging 3.5. Aandachtspunten voor slijtage van opleggingen 	9 9 11 12 12
4. VOORSCHRIFTEN VOOR BRUGOPLEGGINGEN	15
 4.1. Europese voorschriften voor opleggingen 4.2. Tests voor glijopleggingen (NEN-EN 1337-2) 4.3. Tests voor potopleggingen (NEN-EN 1337-5) 4.4. Kanttekeningen die worden gesteld aan de tests 	15 15 18 21
5. VERKEERSBELASTINGEN	23
 5.1. VRACHTVERKEER 5.2. EUROPESE VOORSCHRIFTEN VOOR VERKEERSBELASTINGEN (NEN-EN 1991-2) 5.3. NATIONALE MODELLEN VOOR VERKEERSBELASTINGEN 5.4. VRACHTWAGEN POSITIE OP DE BRUG 5.5. VERKEERSSIMULATIE 	23 23 25 27 28
6. THERMISCHE BELASTINGEN	29
 6.1. Thermische invloeden 6.2. Europese voorschriften voor thermische belastingen 6.3. Thermische belasting 	29 30 36

7. EINDIGE ELEMENTEN MODEL DINTELHAVENBRUG (1)	37
7.1. EINDIGE ELEMENTEN SOFTWARE	37
7.2. Modelleren van de betonconstructie	37
7.3. Modelleren van de opleggingen	38
7.4. Statische belasting	39
7.5. Dynamische belasting	39
7.6. Modal analysis	41
7.7. TRANSIENT RESPONSE ANALYSIS	41
7.8. DEMPING	43
7.9. TIJDSTAP	44
8. EINDIGE ELEMENTEN MODEL DINTELHAVENBRUG (2)	45
8.1. TESTMODEL	45
8.2. Verificatie testmodel	47
8.3. Mesh verfijning	48
8.4. Oplegging als stijve plaatelementen in combinatie met een staafelement	50
8.5. Modal Analysis	51
8.6. Transient Response Analysis	51
8.7. DEMPING	52
8.8. TIJDSTAP	54
8.9. Geverifieerd eindige elementen model	55
8.9. GEVERIFIEERD EINDIGE ELEMENTEN MODEL 9. GEDRAG VAN OPLEGGINGEN ALS GEVOLG VAN STATISCHE VERKEERSBELASTIN	55 G 57
 8.9. Geverifieerd eindige elementen model 9. GEDRAG VAN OPLEGGINGEN ALS GEVOLG VAN STATISCHE VERKEERSBELASTIN 9.1. Eenheidsaslast 	55 G 57 57
 8.9. GEVERIFIEERD EINDIGE ELEMENTEN MODEL 9. GEDRAG VAN OPLEGGINGEN ALS GEVOLG VAN STATISCHE VERKEERSBELASTIN 9.1. EENHEIDSASLAST 9.2. VERKEERSBELASTING 	55 G 57 57 57
 8.9. Geverifieerd eindige elementen model 9. GEDRAG VAN OPLEGGINGEN ALS GEVOLG VAN STATISCHE VERKEERSBELASTIN 9.1. Eenheidsaslast 9.2. Verkeersbelasting 9.3. Invloed van wrijving in de opleggingen 	55 G 57 57 57 64
 8.9. GEVERIFIEERD EINDIGE ELEMENTEN MODEL 9. GEDRAG VAN OPLEGGINGEN ALS GEVOLG VAN STATISCHE VERKEERSBELASTIN 9.1. EENHEIDSASLAST 9.2. VERKEERSBELASTING 9.3. INVLOED VAN WRIJVING IN DE OPLEGGINGEN 9.4. INVLOED VAN DE VOLGAFSTAND VAN VRACHTWAGENS 	55 G 57 57 64 69
 8.9. Geverifieerd eindige elementen model 9. GEDRAG VAN OPLEGGINGEN ALS GEVOLG VAN STATISCHE VERKEERSBELASTIN 9.1. Eenheidsaslast 9.2. Verkeersbelasting 9.3. Invloed van wrijving in de opleggingen 9.4. Invloed van de volgafstand van vrachtwagens 9.5. Invloed van het aantal vrachtwagens 	55 G 57 57 57 64 69 71
 8.9. GEVERIFIEERD EINDIGE ELEMENTEN MODEL 9. GEDRAG VAN OPLEGGINGEN ALS GEVOLG VAN STATISCHE VERKEERSBELASTIN 9.1. EENHEIDSASLAST 9.2. VERKEERSBELASTING 9.3. INVLOED VAN WRIJVING IN DE OPLEGGINGEN 9.4. INVLOED VAN DE VOLGAFSTAND VAN VRACHTWAGENS 9.5. INVLOED VAN HET AANTAL VRACHTWAGENS 9.6. CONCLUSIES 	55 57 57 57 64 69 71 74
 8.9. GEVERIFIEERD EINDIGE ELEMENTEN MODEL 9. GEDRAG VAN OPLEGGINGEN ALS GEVOLG VAN STATISCHE VERKEERSBELASTIN 9.1. EENHEIDSASLAST 9.2. VERKEERSBELASTING 9.3. INVLOED VAN WRIJVING IN DE OPLEGGINGEN 9.4. INVLOED VAN DE VOLGAFSTAND VAN VRACHTWAGENS 9.5. INVLOED VAN HET AANTAL VRACHTWAGENS 9.6. CONCLUSIES 10. GEDRAG VAN OPLEGGINGEN ALS GEVOLG VAN DYNAMISCHE 	55 G 57 57 57 64 69 71 74
 8.9. GEVERIFIEERD EINDIGE ELEMENTEN MODEL 9. GEDRAG VAN OPLEGGINGEN ALS GEVOLG VAN STATISCHE VERKEERSBELASTIN 9.1. EENHEIDSASLAST 9.2. VERKEERSBELASTING 9.3. INVLOED VAN WRIJVING IN DE OPLEGGINGEN 9.4. INVLOED VAN DE VOLGAFSTAND VAN VRACHTWAGENS 9.5. INVLOED VAN HET AANTAL VRACHTWAGENS 9.6. CONCLUSIES 10. GEDRAG VAN OPLEGGINGEN ALS GEVOLG VAN DYNAMISCHE VERKEERSBELASTING 	55 G 57 57 64 69 71 74 77
 8.9. GEVERIFIEERD EINDIGE ELEMENTEN MODEL 9. GEDRAG VAN OPLEGGINGEN ALS GEVOLG VAN STATISCHE VERKEERSBELASTINU 9.1. EENHEIDSASLAST 9.2. VERKEERSBELASTING 9.3. INVLOED VAN WRIJVING IN DE OPLEGGINGEN 9.4. INVLOED VAN WRIJVING IN DE OPLEGGINGEN 9.4. INVLOED VAN DE VOLGAFSTAND VAN VRACHTWAGENS 9.5. INVLOED VAN HET AANTAL VRACHTWAGENS 9.6. CONCLUSIES 10. GEDRAG VAN OPLEGGINGEN ALS GEVOLG VAN DYNAMISCHE VERKEERSBELASTING 10.1. DYNAMISCHE VERKEERSBELASTING 	55 57 57 64 69 71 74 77
 8.9. GEVERIFIEERD EINDIGE ELEMENTEN MODEL 9. GEDRAG VAN OPLEGGINGEN ALS GEVOLG VAN STATISCHE VERKEERSBELASTIN 9.1. EENHEIDSASLAST 9.2. VERKEERSBELASTING 9.3. INVLOED VAN WRIJVING IN DE OPLEGGINGEN 9.4. INVLOED VAN DE VOLGAFSTAND VAN VRACHTWAGENS 9.5. INVLOED VAN HET AANTAL VRACHTWAGENS 9.6. CONCLUSIES 10. GEDRAG VAN OPLEGGINGEN ALS GEVOLG VAN DYNAMISCHE VERKEERSBELASTING 10.1. DYNAMISCHE VERKEERSBELASTING 10.2. DYNAMISCHE VERGROTINGSFACTOR 	55 5 57 57 64 69 71 74 77 77 77
 8.9. GEVERIFIEERD EINDIGE ELEMENTEN MODEL 9. GEDRAG VAN OPLEGGINGEN ALS GEVOLG VAN STATISCHE VERKEERSBELASTIN 9.1. EENHEIDSASLAST 9.2. VERKEERSBELASTING 9.3. INVLOED VAN WRIJVING IN DE OPLEGGINGEN 9.4. INVLOED VAN DE VOLGAFSTAND VAN VRACHTWAGENS 9.5. INVLOED VAN HET AANTAL VRACHTWAGENS 9.6. CONCLUSIES 10. GEDRAG VAN OPLEGGINGEN ALS GEVOLG VAN DYNAMISCHE VERKEERSBELASTING 10.1. DYNAMISCHE VERKEERSBELASTING 10.2. DYNAMISCHE VERKEERSBELASTING 11. GEDRAG VAN OPLEGGINGEN ALS GEVOLG VAN THERMISCHE BELASTING 	55 5 57 57 64 69 71 74 77 77 77 81
 8.9. GEVERIFIEERD EINDIGE ELEMENTEN MODEL 9. GEDRAG VAN OPLEGGINGEN ALS GEVOLG VAN STATISCHE VERKEERSBELASTIN 9.1. EENHEIDSASLAST 9.2. VERKEERSBELASTING 9.3. INVLOED VAN WRIJVING IN DE OPLEGGINGEN 9.4. INVLOED VAN WRIJVING IN DE OPLEGGINGEN 9.4. INVLOED VAN DE VOLGAFSTAND VAN VRACHTWAGENS 9.5. INVLOED VAN HET AANTAL VRACHTWAGENS 9.6. CONCLUSIES 10. GEDRAG VAN OPLEGGINGEN ALS GEVOLG VAN DYNAMISCHE VERKEERSBELASTING 10.1. DYNAMISCHE VERKEERSBELASTING 10.2. DYNAMISCHE VERGROTINGSFACTOR 11. GEDRAG VAN OPLEGGINGEN ALS GEVOLG VAN THERMISCHE BELASTING 11.1. THERMISCHE INVLOEDEN MODELLEREN MET MIDAS CIVIL 	55 G 57 57 64 69 71 74 77 77 81 81
 8.9. GEVERIFIEERD EINDIGE ELEMENTEN MODEL 9. GEDRAG VAN OPLEGGINGEN ALS GEVOLG VAN STATISCHE VERKEERSBELASTIN 9.1. EENHEIDSASLAST 9.2. VERKEERSBELASTING 9.3. INVLOED VAN WRIJVING IN DE OPLEGGINGEN 9.4. INVLOED VAN WRIJVING IN DE OPLEGGINGEN 9.4. INVLOED VAN DE VOLGAFSTAND VAN VRACHTWAGENS 9.5. INVLOED VAN HET AANTAL VRACHTWAGENS 9.6. CONCLUSIES 10. GEDRAG VAN OPLEGGINGEN ALS GEVOLG VAN DYNAMISCHE VERKEERSBELASTING 10.1. DYNAMISCHE VERKEERSBELASTING 10.2. DYNAMISCHE VERKEERSBELASTING 11.1. GEDRAG VAN OPLEGGINGEN ALS GEVOLG VAN THERMISCHE BELASTING 11.1. THERMISCHE INVLOEDEN MODELLEREN MET MIDAS CIVIL 11.2. JAARLIJKSE TEMPERATUURWISSELING 	55 5 57 57 64 69 71 74 77 77 77 81 81 81
 8.9. GEVERIFIEERD EINDIGE ELEMENTEN MODEL 9. GEDRAG VAN OPLEGGINGEN ALS GEVOLG VAN STATISCHE VERKEERSBELASTIN 9.1. EENHEIDSASLAST 9.2. VERKEERSBELASTING 9.3. INVLOED VAN WRIJVING IN DE OPLEGGINGEN 9.4. INVLOED VAN DE VOLGAFSTAND VAN VRACHTWAGENS 9.5. INVLOED VAN HET AANTAL VRACHTWAGENS 9.6. CONCLUSIES 10. GEDRAG VAN OPLEGGINGEN ALS GEVOLG VAN DYNAMISCHE VERKEERSBELASTING 10.1. DYNAMISCHE VERKEERSBELASTING 10.2. DYNAMISCHE VERGROTINGSFACTOR 11. GEDRAG VAN OPLEGGINGEN ALS GEVOLG VAN THERMISCHE BELASTING 11.1. THERMISCHE INVLOEDEN MODELLEREN MET MIDAS CIVIL 11.2. JAARLIJKSE TEMPERATUURWISSELING 11.3. DAGELIJKSE TEMPERATUURWISSELING 	55 5 57 57 64 69 71 74 77 77 81 81 81 87

12. CONCLUSIES EN AANBEVELINGEN	97
12.1. CONCLUSIES	97
12.2. AANBEVELINGEN	99
BIJLAGEN	101
REFERENTIES	189

1. INTRODUCTIE

1.1. Probleemstelling

Een brugoplegging is een onderdeel van de brugconstructie dat zich tussen de bovenbouw en de onderbouw van de brug bevindt. Brugopleggingen brengen krachten over van de bovenbouw naar de onderbouw van de brug en staan de bovenbouw toe te verplaatsen en roteren. Krachten, verplaatsingen en rotaties die de opleggingen te verwerken krijgen, zorgen voor een slijtageproces van de oplegging. Dit heeft uiteindelijk als gevolg dat een oplegging gerenoveerd of vervangen moeten worden, op intervallen die korter zijn dan de levensduur van de brugconstructie.

Om de levensduur van een oplegging te vergroten, zijn in de afgelopen tijd en worden nog steeds pogingen gedaan om materialen te ontwikkelen die beter bestand zijn tegen slijtage. De tests waaraan de huidige en ook nieuwe materialen worden onderworpen, zijn opgenomen de Europese norm NEN-EN 1337. Het betreft tests waarin krachten op een proefstuk worden uitgeoefend, die gelijktijdig verplaatsingen of rotaties te verwerken krijgt. De kracht op het proefstuk is sinusvormig of constant in de tijd, na geleidelijk aangebracht te zijn. De verplaatsing is uitgedrukt in een slijtweg, wat gelijk is aan een sommatie van de verplaatsingen die een oplegging te verwerken krijgt. De rotatie wordt gegenereerd door een kracht op een hefboomsarm, die een sinusvormige beweging maakt. Zowel de sinusvormige belasting als de sinusvormige beweging heeft een constante amplitude en een constante snelheid. Echter, in de praktijk hebben we niet te maken met constante amplitudes, snelheden en belastingen, maar met willekeurige belastingen die worden gecombineerd met willekeurige bewegingen en snelheden.

Nieuwe en huidige materialen voor opleggingen worden onderworpen aan tests zoals beschreven in NEN-EN 1337. Met deze huidige tests worden materialen niet getoetst op het verwerken van krachten, verplaatsingen en rotaties zoals deze in de praktijk voorkomen.

1.2. Doelstelling

Voor het ontwikkelen van nieuwe materialen en testen van huidige materialen voor brugopleggingen, om zo de slijtage van opleggingen te verminderen en dus de levensduur te vergroten, is het van belang dat de huidige tests kritisch worden beoordeeld.

Om een kritisch oordeel te kunnen geven over de huidige tests waarop materialen voor opleggingen getoetst worden, dient de variabele belasting- en bewegingsgeschiedenis van brugopleggingen van een betonnen brug in kaart te worden gebracht. Dit met als doel om inzicht te krijgen in de krachten, verplaatsingen en rotaties die een oplegging tijdens zijn levensduur te verwerken krijgt. Deze resultaten kunnen worden vergeleken met de waarden in de huidige tests NEN-EN 1337 Deel 2: Glijdelen en NEN-EN 1337 Deel 5: Potopleggingen. Het is vervolgens aan de normcommissie voor brugopleggingen om op basis van de verkregen resultaten uitspraken te doen over een eventuele aanpassing van de huidige tests, of om nieuwe tests te ontwikkelen die representatief zijn voor het werkelijke gedrag van de opleggingen. Materialen moeten immers getest kunnen worden op het verwerken van krachten, verplaatsingen en rotaties die representatief zijn voor de werkelijke krachten, verplaatsingen en rotaties die een oplegging tijdens zijn levensduur te verwerken krijgt.

1.3. Aanpak

Voor het in kaart brengen van de variabele belasting- en bewegingsgeschiedenis van brugopleggingen van een betonnen brug, zal een bestaande brug gemodelleerd worden, de westbrug van de Dintelhavenbruggen. Met dit eindige elementen model wordt het gedrag van de brug geanalyseerd, wanneer deze wordt onderworpen aan belastingen met willekeurige bewegingen en snelheden. Voor dit onderzoek is gekozen om gebruik te maken van de Dintelhavenbrug, omdat het een representatieve betonnen kokerliggerbrug betreft.

Voordat een model van deze brug gemaakt kan worden, zal deze brug eerst nader wordt geanalyseerd met betrekking tot zijn locatie, geometrie, materiaaleigenschappen, opleggingen en indeling van de rijbaan. Vervolgens zullen de typen opleggingen, die onderdeel zijn van deze brug, specifiek worden beschreven en mogelijke slijtage fenomenen worden besproken. De tests met betrekking tot deze opleggingen, zoals deze beschreven staan in NEN-EN 1337 deel 2 en deel 5, worden vervolgens toegelicht. Tot slot worden twee hoofdstukken gewijd aan achtereenvolgens de verkeersbelasting en thermische belasting die in rekening gebracht zullen worden, alvorens een uiteenzetting van het modeleerproces en de verkregen resultaten wordt gegeven.

2. DINTELHAVENBRUG

2.1. Locatie

In het Rotterdamse havengebied zijn twee verkeersbruggen en een spoorbrug aangelegd, de Dintelhavenbruggen (figuur 1). De Dintelhavenbruggen in de A15 overspannen de toeloop naar de Dintelhaven. De verkeersbruggen zijn aangelegd vanwege het toenemende verkeer in oost-west richting aan de zuidzijde van het havengebied, als gevolg van de uitbreiding van het Europoort gebied.



Figuur 1: Bovenaanzicht Dintelhavenbrug (Google Maps 2010)

Voor beide rijrichtingen is een aparte brug aanwezig. Voor dit onderzoek zal alleen gekeken worden naar de westbrug, die per steunpunt ondersteund wordt door twee opleggingen. Wanneer hierna gesproken wordt over de Dintelhavenbrug, wordt de te beschouwen westbrug bedoeld.



Figuur 2: Dintelhavenbrug (oostbrug)



Figuur 3: Dintelhavenbruggen

2.2. Geometrie

De Dintelhavenbrug (figuur 4) is een voorgespannen betonnen brug, met een hoofdoverspanning van 184.95m en zijoverspanningen van 86.5m. De totale lengte bedraagt daarmee 357.95m.

86,5	184,95	86,5

Figuur 4: Langsdoorsnede met veldlengten

De hoofdoverspanning en zijoverspanningen zijn opgedeeld in componenten, die gebruikelijk zijn voor een betonnen uitbouwbrug. Deze componenten met bijbehorende lengte zijn in onderstaand schema opgesomd.

zijoverspanning	aanzetstuk: sluitstuk: 11 moten (5m per moot): 4 moten (4m per moot): hamerstuk in eindveld:	3.5m 5m 55m 16m 7m
hoofdoverspanning	hamerstuk in middenveld: 4 moten (4m per moot): 13 moten (5m per moot): sluitstuk: 13 moten (5m per moot): 4 moten (4m per moot): hamerstuk in middenveld:	8.975m 16m 65m 5m 65m 16m 8.975m
zijoverspanning	hamerstuk in eindveld: 4 moten (4m per moot): 11 moten (5m per moot): sluitstuk: aanzetstuk:	7m 16m 55m 5m 3.5m

Ter verduidelijking is in bijlage A1 een figuur opgenomen, waarin een bovenaanzicht en langsdoorsnede van de brug zijn afgebeeld. Onder de langsdoorsnede staan de benamingen van de verschillende brugcomponenten. Zoals te zien in de langsdoorsnede heeft de brug geen constante doorsnede. De doorsnede bestaat uit een eencellige koker, waarvan de hoogte (h), vloerdikte (d) en de breedte van de bovenflens (b1 en b2) variabel zijn. De constanten zijn met hun waarden en variabelen met hun symbool weergegeven in figuur 5. De waarden van de variabelen (bijlage A2) zijn per snede afgelezen in de ontwerptekeningen. De verkanting van 1:40 zal buiten beschouwing worden gelaten.



Figuur 5: Dwarsdoorsnede met variabelen h, d, b1 en b2

Een ander belangrijk punt van aandacht in de geometrie zijn de afmetingen van de hamerstukken en aanzetstukken, waar onregelmatigheden in vloerdikten en wanden plaatsvinden. Tevens zijn er in het hamerstuk een dwarsdrager en twee steunberen aanwezig en is ballastbeton in het aanzetstuk en de sluitmoot aangebracht. De exacte afmetingen van de hamerstukken en aanzetstukken zijn af te lezen in de afbeeldingen die opgenomen zijn in bijlagen A3, A4 en A5.

2.3. Materiaaleigenschappen

De Dintelhavenbrug is een voorgespannen betonnen eencellige kokerligger brug. Het beton van de koker heeft een betonkwaliteit B85, dat is voorgespannen met FeP1860 voorspankabels met een doorsnede van 1900mm² en een overspanning van 8.64%. Het betonstaal is van de kwaliteit FeB500. Bij het modelleren van de brug zal er van worden uitgegaan dat we te maken hebben met een ongescheurde brugconstructie, die zich lineair elastisch gedraagt. De voorspankabels en het wapeningstaal worden in het model achterwegen gelaten.

De wegverharding op de brug bestaat achtereenvolgens uit een laag ZOAB (50mm), STAB (50mm) en als uitvullaag DAB (40mm). Het eigen gewicht van de wegverharding bedraagt ongeveer 25kN/m³. In het model zal de totale wegverharding van 140mm dik, als gelijkmatig verdeelde belasting van $0.14 \cdot 25 = 3.5$ kN/m² in rekening worden gebracht. Ook het ballastbeton met een betonkwaliteit B25, zal als gelijkmatig verdeelde belasting in rekening gebracht worden.

2.4. Rijbaan indeling

Eén van de belastingen die in rekening gebracht zal worden, is de belasting ten gevolge van het verkeer op de brug. Voor dit onderzoek zal als verkeersbelasting alleen het vrachtverkeer in rekening worden gebracht. In de praktijk zullen vrachtwagens van rijstrook kunnen wisselen, maar voor dit onderzoek wordt als uitgangspunt genomen dat alle vrachtwagens zich op de rechter rijstrook van de hoofdrijbaan bevinden.

De rijbaan op de brug bestaat uit drie rijstroken, waarvan twee stroken als hoofdrijbaan en één strook als invoegstrook fungeren (figuur 6). Het vrachtverkeer zal zich dus op basis van het vorige uitgangspunt op de middelste rijstrook bevinden, de rechter rijstrook van de hoofdrijbaan.



Figuur 6: Schematisering bovenaanzicht rijbaanindeling voor de Dintelhavenbrug (westbrug)

Opvallend in de indeling van de rijbaan is het verloop van de rijstroken ter hoogte van het rechter landhoofd. De invoegstrook en de rijstroken van de hoofdrijbaan lopen hier uit elkaar. Aangezien de Dintelhavenbrug als referentiebrug gekozen is, zal exacte modellering geen vereiste zijn. Om die reden is er voor gekozen om het verloop van de rijstroken, waar de stroken met een bepaalde kromming uit elkaar lopen, niet in de modellering op te nemen. Er wordt verondersteld dat de stroken recht over de brug lopen, zoals op het voorafgaande deel van het brugdek ook het geval is.



Figuur 7: Doorsnede rijbaanindeling voor de Dintelhavenbrug (westbrug)

Het verwaarlozen van de kromming van de rijstroken in de modellering, zal als gevolg hebben dat de excentriciteit van de verkeersbelasting constant zal zijn. Dit is een situatie die representatief is voor de meeste vergelijkbare betonnen uitbouwbruggen in Nederland, dan wanneer een veranderde excentriciteit in rekening gebracht zal worden als gevolg van een gekromd verloop van de rijstroken.

2.5. Opleggingen

De opleggingen dienen de brug een vrijheid en tegelijkertijd ook een beperking te geven in de mate van beweging. Vrijheid om uitzetten en krimpen ten gevolge van vooral veranderingen in temperatuur mogelijk te maken, beperkingen om de brug op zijn plaats te houden. Iedere oplegging van de brug heeft zijn eigen vrijheidsgraden, deze zijn voor de opleggingen van de Dintelhavenbrug in figuur 8 weergegeven.



Figuur 8: Vrijheidsgraden

Het hart van de opleggingen van steunpunt 1 en 4 bevinden zich op 1m en voor steunpunt 2 en 3 op 1.5m van de kokerrand (figuur 8).

Op basis van het verschil in vrijheidsgraden en de grootte van de bewegingen, rotaties en krachten die een oplegging te verwerken krijgt, zijn in de loop der jaren verschillende typen opleggingen ontwikkeld. De typen opleggingen die onderdeel zijn van de Dintelhavenbrug zijn potopleggingen en bolsegment opleggingen (tabel 1). Indien deze opleggingen horizontale verplaatsingen toestaan, zijn ze uitgevoerd in combinatie met een glijvlak.

Oplegging	Type oplegging
w.1.a	Bolsegment oplegging
w.1.b	Bolsegment oplegging
w.2.a	Potoplegging (CD Tetron Bearing)
w.2.b	Potoplegging (CD Tetron Bearing)
w.3.a	Potoplegging (CD Tetron Bearing)
w.3.b	Potoplegging (CD Tetron Bearing)
w.4.a	Bolsegment oplegging
w.4.b	Bolsegment oplegging

 Tabel 1: Typen opleggingen Dintelhavenbrug

In het volgende hoofdstuk zal dieper in worden gegaan op de opbouw, eigenschappen, materialen en slijtage fenomenen van deze typen opleggingen.

3. OPLEGGINGEN

3.1. Algemeen

De huidige moderne opleggingen zijn in staat grote krachten af te dragen en grote verplaatsingen en rotaties op te nemen. Er zijn in de loop der jaren verschillende opleggingen ontwikkeld, waarbij de ene oplegging meer geschikt is voor kracht afdracht en de andere oplegging meer geschikt is voor het verwerken van rotaties of verplaatsingen.

De typen opleggingen die onderdeel uitmaken van de Dintelhavenbrug, zullen in dit hoofdstuk worden beschouwd. Dit zijn achtereenvolgens:

- Glijoplegging
- Potoplegging
- Bolsegment oplegging

3.2. Glijoplegging

Het glijvlak in een glijoplegging maakt grote horizontale translaties mogelijk. De glijvlakken die nu op de markt of in ontwikkeling zijn, zijn gemaakt van PTFE, MSM, UHMWPE of DU-A/DU-B. Over een glijvlak, gemaakt van een van de hiervoor genoemde materialen, beweegt een stalen plaat. Aangezien PTFE op dit moment het meest wordt gebruikt en alleen dit materiaal individueel of samengesteld opgenomen is in de tests in NEN-EN 1337, zal op glijvlakken gemaakt van dit materiaal dieper in worden gegaan. Een PTFE (PolyTetraFluorEthyleen) plaat bevat kuiltjes met een grootte van 8mm, waarin een smeervet wordt aangebracht. Hiermee wordt een permanente smering van het glijoppervlak gegarandeerd. Onderstaande figuren zijn foto's van potopleggingen die van glijvlakken zijn voorzien. Deze opleggingen hebben deel uit gemaakt van de brug over de Nederrijn bij Heteren en zijn uiteindelijk vervangen. De opleggingen die hier afgebeeld zijn, zijn gedemonteerd. De witte PTFE platen die voorzien zijn van smeerkuiltjes zijn duidelijk zichtbaar.



Figuur 9: Gedemonteerde van glijvlakken voorziende potopleggingen van de brug over de Nederrijn bij Heteren



Figuur 10: Gedemonteerde van glijvlakken voorziende potopleggingen van de brug over de Nederrijn bij Heteren

De wrijvingskracht F_w tussen glijvlakken wordt bepaald door twee parameters, de wrijvingscoëfficiënt μ en de normaalkracht N op het glijvlak, waarmee: $F_w = \mu$ N. De waarde van de wrijvingscoëfficiënt wordt door veel factoren beïnvloed: contactdruk, temperatuur, snelheid van bewegen, slijtage, ruwheid van materiaal, smeerkuiltjes en smering, excentrisch belasten [10]. Een hogere contactdruk (drukspanning) zorgt voor een afname van de wrijvingscoëfficiënt, terwijl een lagere temperatuur juist een toename van de waarde van de wrijvingscoëfficiënt tot gevolg heeft. De ontwerpwaarde van de wrijvingscoëfficiënt kan worden gebaseerd op de grafiek van figuur 11, welke volgt uit nationale documentatie voor brugopleggingen [2].



Figuur 11: Wrijvingscoëfficiënt van gesmeerde PTFE in relatie tot de drukspanning

De waarden in deze grafiek voor een temperatuur van T = -35° C komen overeen met de waarden zoals deze vermeld zijn in tabel 11 van NEN-EN1337-2. De formule voor deze grafiek, opgenomen in Annex B van NEN-EN1337-2 en in *Structural Bearings* [13], luidt

$$\mu = \frac{1.2}{(10 + \sigma_p)}$$

waarin σ_p gelijk is aan de contactdruk in het PTFE glijvlak. Voor een temperatuur van 20^{0} C kan de voorgaande formule met 2/3 worden vermenigvuldigd. Met lineaire interpolatie wordt gevonden dat voorgaande formule voor een temperatuur van 10^{0} C, de gemiddelde temperatuur in Nederland, met 8/11 vermenigvuldigd dient te worden. Aangezien de wrijvingscoëfficiënt afhankelijk is van de drukspanning, zal de waarde van deze coëfficiënt in een later stadium worden bepaald wanneer de drukspanningen van de opleggingen bekend zijn.

Zoals gezegd maken glijvlakken grote horizontale translatie mogelijk. Wanneer translatie in slechts één richting gewenst is en translatie in de richting loodrecht daarop tegen moet worden gegaan, wordt gebruik gemaakt van geleidingen. Dit kan een centrale geleiding zijn ter hoogte van de as van de oplegging, zoals in de potopleggingen van figuren 9 en 10, of zijdelingse geleidingen die aan de randen van de oplegging worden aangebracht.

Glijvlakken kunnen behalve in potopleggingen ook in andere typen opleggingen worden toegepast. In een bolsegment wordt bijvoorbeeld een glijvlak gekromd uitgevoerd, om rotaties mogelijk te maken. De configuratie en werking van de potoplegging en bolsegment oplegging wordt hierna toegelicht.

3.3. Potoplegging

De doorsnede van een potoplegging, voorzien van een glijvlak, is afgebeeld in figuur 12. De potoplegging is opgebouwd uit een natuurlijke ongewapende elastomeer schijf, die zich in een stalen pot bevindt. De pot wordt afgedekt door middel van een deksel. Van groot belang is de afdichting tussen de elastomeer schijf, het tussenzadel en de rand van de pot, wat gerealiseerd wordt met een interne afdichting (afdichtring) en externe afdichting. Bij onvoldoende afdichting kan de elastomeer schijf uit de pot worden gedrukt. De afdichtring kan van verschillende materialen worden gemaakt. In de potopleggingen van de Dintelhavenbrug zijn deze ringen van brons/messing (brass seal).



Figuur 12: Potoplegging i.c.m. een glijoplegging

Dit type oplegging is in staat grote verticale belastingen op te nemen en kan daarnaast ook kleine rotaties verwerken. Om rotaties toe te laten, is er enige ruimte tussen de rand van het deksel en de pot aanwezig. Een potoplegging staat geen horizontale verplaatsingen toe, mits de oplegging gecombineerd wordt met een glijoplegging zoals in voorgaande figuur. Horizontale belastingen worden direct opgevangen doordat het deksel door de rand van de pot wordt tegen gehouden.

3.4. Bolsegment oplegging

De doorsnede van een bolsegment oplegging, voorzien van een glijvlak, is afgebeeld in figuur 13. De bolsegment oplegging is opgebouwd uit een onderzadel die een gekromd bovenoppervlak heeft. Op dit gekromde vlak is een PTFE plaat aangebracht, voorzien van smeerkuiltjes. Het onderoppervlak van het hard chromen bolsegment fungeert als een glijoppervlak, waardoor rotaties mogelijk worden gemaakt.



Figuur 13: Bolsegment oplegging i.c.m. een glijoplegging

Naast rotaties is een bolsegment oplegging in staat verticale krachten op te nemen. Een bolsegment oplegging staat geen horizontale verplaatsingen toe, mits de oplegging gecombineerd wordt met een glijoplegging zoals in figuur 13.

Wanneer rotaties in een bepaalde richting niet gewenst zijn, kan in plaats van een bolsegment gebruik gemaakt worden van een cilindersegment oplegging. Dit is een in één richting gebogen glijoplegging, geschikt voor rotaties in één richting.

3.5. Aandachtspunten voor slijtage van opleggingen

De belastingen, verplaatsingen en rotaties die opleggingen te verwerken krijgen, zorgen er voor dat opleggingen op een aantal plaatsen kunnen slijten of bezwijken. De slijtage fenomenen die afgelopen jaren aan het daglicht zijn gekomen zijn de slijtage van PTFE platen en slijtage door wrijving tussen de deksel en de rand van de pot.

Slijtage van PTFE platen treden op in zowel rechte vlakken als gekromde vlakken, die respectievelijk dienen voor het verwerken van translaties en rotaties. De verticale oplegdrukken in combinatie met horizontale verplaatsingen spelen een belangrijke rol in het slijtage proces van PTFE platen in horizontale glijvlakken. Daarentegen spelen bij PTFE platen die aangebracht worden op geleidingen de horizontale oplegkrachten in combinatie met horizontale verplaatsingen een belangrijke rol. De richting van de horizontale oplegkrachten zijn bepalend voor welke vlakken van de geleiding aanliggen en welke vlakken niet of nauwelijks contact maken.

De grootte van de slijtweg, met andere woorden de afgelegde afstand van twee contactvlakken die ten opzichte van elkaar bewegen, en de snelheid waarmee deze slijtweg wordt afgelegd spelen ook een belangrijke rol in het slijtageproces van PTFE platen. Hoe groter de slijtweg, hoe meer slijtage er uiteraard op zal treden. Een laatste punt van aandacht is de verdeling van het smeervet over de PTFE plaat. Wanneer een glijplaat beweegt over de PTFE plaat, zal het smeervet dat in de smeerkuiltjes is aangebracht, zich in de loop der tijd verdelen over het glijoppervlak. Op deze wijze zal het glijoppervlak altijd van smeervet worden blijven voorzien. Echter, aan de rand van de PTFE plaat kan het smeervet uittreden, waardoor de randen van de PTFE plaat minder of uiteindelijk niet meer gesmeerd zullen zijn.

Dit heeft als gevolg dat de krachtsverdeling over de PTFE plaat verandert en dat de wrijvingscoëfficiënt plaatselijk verschilt over het oppervlak. Slijtage aan de randen van PTFE plaat zal hiervan het gevolg zijn.

Bij een potoplegging vindt slijtage van de pot en de deksel plaats. De deksel maakt een schurende beweging langs de wand van de pot, waardoor het deksel, de afdichtring en de pot slijten. Wanneer de slijtage zoveel ruimte heeft veroorzaakt tussen het deksel en de pot, kan dit als gevolg hebben dat de elastomeer schijf uit de pot geperst wordt.

Wanneer te veel slijtage is opgetreden of wanneer een oplegging te ernstig beschadigd is, zal de oplegging gerenoveerd of vervangen moeten worden. Dit blijkt nodig te zijn op intervallen die korter zijn dan de levensduur van de brugconstructie. Het feit dat slijtage van opleggingen op blijken te treden, betekent dat het zinvol is om de eisen waaraan de glij-, pot- en bolsegment opleggingen op dit moment moeten voldoen en de tests waaraan de representatieve proefopstelling worden onderworpen, nader te bekijken.

4. VOORSCHRIFTEN VOOR BRUGOPLEGGINGEN

4.1. Europese voorschriften voor opleggingen

De Europese norm voor brugopleggingen is de NEN-EN 1337: Voorschriften voor opleggingen voor bouwkundige en civieltechnische toepassingen. In deze norm zijn tests opgenomen, waaraan materialen waarvan opleggingen worden gemaakt moeten voldoen. Voor het testen van de materialen wordt gebruik gemaakt van proefopstellingen, die tevens in deze norm zijn beschreven. Wanneer de tests worden doorstaan, wordt geacht dat een materiaal en daarmee de oplegging bestand is tegen krachten, verplaatsingen en rotaties die gedurende de levensduur van de oplegging verwerkt moeten worden.

Aan de tests die in de Europese voorschriften opgenomen zijn, worden echter een aantal kanttekeningen gesteld. In de volgende paragraven zullen de tests voor glijopleggingen en potopleggingen worden beschreven, waarna verder ingegaan wordt op de waarde van deze tests. Voor de exacte en complete beschrijving van de tests wordt verwezen naar NEN-EN 1337: 2004.

4.2. Tests voor glijopleggingen (NEN-EN 1337-2)

In NEN-EN 1337-2 bijlage D is een test opgenomen, waarmee de wrijvingscoëfficiënt van het glijoppervlak van een oplegging kan worden bepaald.

De proefopstelling (figuur 14) van de test bestaat uit:

- een druk testmachine die in staat is een constante kracht F_z te produceren, waarmee een voorgeschreven contactdruk wordt verkregen
- een plaat die parallel beweegt aan de drukplaten met een voorgeschreven snelheid
- een verzameling rolopleggingen
- een systeem waarmee de drukkracht, wrijvingskracht en de temperatuur tijdens de test periode kan worden gemeten



Figuur 14: Wrijvingstest proefopstelling

De twee vereiste proefstukken voor deze test zijn:

- a) PTFE platen voorzien van smeerkuiltjes
- b) Samengestelde/composieten materialen (CM1 en CM2)





Figuur 15: Proefstuk voor PTFE platen voorzien van smeerkuiltjes



Voor glijvlakken zijn er een beperkt aantal materiaalcombinaties toegestaan. De combinaties van materialen voor de contactoppervlakken in de proefopstellingen, zullen in overeenstemming zijn met de combinaties van materialen die in de praktijk gebruikt worden. De combinaties die door de fabrikanten worden gebruikt, vallen binnen de mogelijkheden zoals vermeld in tabel 2.

Vlak oppervlak		Gekromd oppervlak Geleidingen		Gekromd oppervlak		dingen
			Austenitisch staal	PTFE zonder smeerkuiltjes		
PTFE met smeerkuiltjes	Austenitisch staal	PTFE met smeerkuiltjes	Hard chroom	CM1	Austenitisch staal	
			Aluminium	CM2		

Tabel 2: Toegestane combinaties van materialen voor permanente toepassing als glijvlakken

De richting waarin de materiaalafname (slijtage) plaats heeft, zal loodrecht zijn op de glijrichting. De glijoppervlakken en geleidingen zullen zo worden gesmeerd dat alle kuiltjes gevuld en oppervlakken zo gelijkmatig mogelijk bedekt zijn.

Met de hiervoor beschreven proefopstelling kan voor beide proefstukken een 'short term' en 'long term' test worden uitgevoerd. Voor beide proefstukken is deze test verschillend. De 'short term tests' zijn bedoeld om de geschiktheid van PTFE platen vast te stellen. Hiervoor worden drie temperatuurtests (test C, D en E) uitgevoerd. Samengestelde materialen CM1 en CM2 worden onderworpen aan temperatuurtest E. Op deze tests zal hier verder niet dieper worden ingegaan. Voor de slijtage van opleggingen is het zinvoller om dieper in te gaan op de 'long term test'. Het testprogramma van de 'long term test' is voor beide proefstukken opgebouwd uit twee fasen A en B, die om en om uitgevoerd worden. De parameters en omstandigheden voor deze fase staan in onderstaande tabel vermeld.

Type A (fase 1, 3, 5 Temperatuur – programma – test), constante snelheid				
Grootheid	Symbool	Waarde	Eenheid	
Contactdruk van gesmeerde PTFE	σ_{p}	$0.33f_k = \frac{+3}{0}$	MPa	
Contactdruk van CM1 en CM2	σ_{CM}	0.33f _k ⁺³	MPa	
Temperatuur	Т	0/-10/-20/-35/+35/+21 (±1)	°C	
Temperatuurgradiënt	ΔΤ	0.5 ± 1.0	⁰C/min	
Voorbelast tijd	t _{pl}	1	h	
Glijafstand	S	10 ^{+0.5} ₀	mm	
Verblijftijd aan het eind van de strokes	t _o	12 ± 1	S	
Aantal cycli (twee strokes)	n	1100		
Glijsnelheid	v	0.4 +0.1 0	mm/s	
Verblijftijd tussen fasen	to	1	h	
Туре В (fase 2, 4, 6), va	riabele snel	heid (bij benadering sinusvormig)		
Grootheid	Symbool	Waarde	Eenheid	
Contactdruk van PTFE	σ_{p}	0.33f _k ⁺³	MPa	
Contactdruk van CM1 en CM2	σ_{CM}	0.33f _k ⁺³	MPa	
Temperatuur	Т	+21 (±1)	⁰ C	
Temperatuurgradiënt	ΔΤ	0.5 ± 1.0	⁰C/min	
Glijafstand	S	8 ^{+0.5} 0	mm	
Aantal cycli (twee strokes)	n	62500		
Gemiddelde glijsnelheid	Va	2 ± 0.1	mm/s	

Tabel 3: Wrijvingstest voorwaarden ('long term test')

De waarde van f_k , de karakteristieke druksterkte, is per glijmateriaal verschillend en kan uit onderstaande tabel worden ontleend.

Materiaal	Actie	f _k (MPa)
PTFE voor hoofd oplegging- oppervlakken	Permanente en variabele belastingen	90
	variabele belastingen	90
PTFE voor geleidingen	temperatuur, krimp en kruip	30
	permanente belastingen	10
CM1	Permanente en variabele horizontale belastingen	200
CM2	Permanente en variabele horizontale belastingen	120

Tabel 4: Karakteristieke druk sterkte voor glijmaterialen

Het testprogramma is voor beide proefstukken verschillend. De testprogramma's waaraan PTFE platen (glijweg van 10242m) en samengestelde materialen (glijweg van 2066m) worden onderworpen, zijn in onderstaande tabellen gegeven.

Totale glijweg van 10242m							
Fase nummer	1	2	3		19	20	21
Туре	А	В	А		А	В	А
Afstand	22m	1000m	22m		22m	1000m	22m

Tabel 5: Long term wrijvingstest programma, voor PTFE platen die vlak en gesmeerd zijn

Totale glijweg van 2066m						
Fase nummer	1	2	3	4	5	
Туре	А	В	А	В	А	
Afstand	22m	1000m	22m	1000m	22m	

Tabel 6: Long term wrijvingstest programma, voor glijmaterialen voor geleidingen en gekromde oppervlakken

Gedurende de test worden de wrijvingskrachten gemeten, die nodig zijn om beweging te veroorzaken en behouden in het testproefstuk onder verticale belasting. Met deze gemeten wrijvingskrachten en de corresponderende normaalkracht die aangebracht is op het proefstuk, kunnen de statische en dynamische wrijvingscoëfficiënt worden bepaald.

statische wrijvingscoëfficiënt:

dynamische wrijvingscoëfficiënt:

$$\mu_{s,n} = \frac{F_{x,s,n,}}{F_z}$$
$$\mu_{dyn,n} = \frac{F_{x,max,n,}}{F_z}$$

De wrijvingscoëfficiënten die uit de tests volgen, mogen voorgeschreven waarden zoals vermeld in hoofdstuk 4 van NEN-EN 1337 niet overschrijden.

4.3. Tests voor potopleggingen (NEN-EN 1337-5)

In NEN-EN 1337-5 bijlage D (bepalen van dwangmoment) en bijlage E (long term rotatie en belasting test) zijn tests opgenomen, die aan verschillende slijtage fenomenen gerelateerd zijn. Voor beide tests wordt van dezelfde proefopstellingen gebruik gemaakt.

Er zijn twee proefopstellingen beschikbaar:

- proefopstelling 1: druktest machine, die wordt voorzien van twee potopleggingen, één glijoppervlak en een hefboomsarm (figuur 17)
- proefopstelling 2: druktest machine, die wordt voorzien van slechts één potoplegging, één hydrostatische bolsegment oplegging en een hefboomsarm (figuur 18)



Figuur 17: Proefopstelling 1

Figuur 18: Proefopstelling 2

Door middel van een dubbele hydraulische cilinder kan een kracht F_a op de hefboomsarm worden aangebracht, waarmee de opleggingen continu met ±0.01rad kunnen worden geroteerd. De beweging die de rotatie veroorzaakt zal sinusvormig zijn, met een frequentie variërend tussen 0.003Hz en 0.5Hz. De proefopstelling is voorzien van elektronische meetapparatuur voor het meten van krachten, bewegingen en temperaturen.

Dwangmoment

Het dwangmoment ontstaat in een potoplegging, doordat de oplegging niet volledig vrij kan bewegen. De elastomeerschijf en afdichtring hebben een bepaalde tijd nodig om te reageren op een belasting, voordat rotatie op zal treden. Het dwangmoment kan worden uitgedrukt als functie van de rotatie onder permanente belasting (α_1), de rotatie onder veranderlijke belasting (variërend tussen $\alpha_{2 \min}$ en $\alpha_{2 \max}$) en de diameter van de elastomeer schijf (d).

 $M_{emax} = 32 \times d^3 \times (F_0 + (F_1 \times \alpha_1) + (F_2 \times \alpha_{2max}))$

Voor het bepalen van de factoren F_0 , F_1 en F_2 wordt een test procedure doorlopen (tabel 7), uitgevoerd voor een gesmeerde en ongesmeerde elastomeerschijf.

Testprocedure voor bepalen van factoren voor dwangmoment
1) Aanbrengen van een verticale kracht F _z , om een elastomeer contactspanning van 35N/mm ² met een toename van ongeveer 0.5N/mm ² te produceren
2) Aanbrengen van een sinusvormige beweging van ±0.01rad via de hefboomsarm. Tenminste vijf cyclussen zijn vereist met een frequentie van 0.003Hz \leq f < 0.006Hz, voor het simuleren van rotatie α_2 als gevolg van veranderlijke belasting.
3) Registreer de momenten M_0 , M_1 en M_2 en de rotatiehoek gedurende de tests, registreer daarnaast ook de temperatuur in het midden van de elastomeerschijf
Tabel 7: Testprocedure voor het bepalen van factoren voor het dwangmoment

De resultaten uit de tests zullen worden gebruikt voor het bepalen van de factoren F_0 , F_1 en F_2 . Op de formules waarmee deze factoren worden bepaald zal hier niet verder in worden gegaan.

Het dwangmoment M_{emax} die uiteindelijk volgt, wordt gebruik tijdens het ontwerpen van een potoplegging. Wanneer de oplegging in de SLS beschouwd wordt, zal er evenwicht moeten heersen. Als het dwangmoment te groot is en er geen evenwicht gevormd kan worden, zal de potoplegging niet kunnen functioneren.

Long term rotation and load test

Met de 'long term rotation and load test' (tabel 8) wordt het functioneren van een potoplegging op lange termijn getest. Het gedrag van de potoplegging wordt getoetst op het verwerken van oscillerende relatieve bewegingen tussen de potrand en de afdichtring. Daarnaast geeft de test informatie over het vereiste uiterste draagvermogen van de potoplegging in geroteerde toestand.

Procedure van de 'long term rotation and load test' uitgevoerd bij kamertemperatuur $(+10^{\circ}C < T < +30^{\circ}C)$ 1) Aanbrengen van een verticale kracht F_z , om een elastomeer contactspanning van 35N/mm² met een toename van ongeveer 0.5N/mm²/s te produceren 2) Sinusvormig aanbrengen van een minimum rotatiehoek van +0.0025 en -0.0025rad door middel van de hefboomsarm met een frequentie van 0.25Hz < f < 2.5Hz 3) De test duurt voort totdat de geselecteerde slijtweg is bereikt. Voor de bij elkaar opgetelde slijtweg dient gebruik gemaakt te worden van één van de onderstaande standaard waarden; a) 500m roestvrijstalen afdichtring (stainless steel seal) b) 1000m bronzen afdichtring (brass seal) c) 2000m polyoxymethylene afdichtring (POM seal) koolstof gevulde PTFE afdichtring (carbon filled PTFE seal) 4) Continu vastleggen van het dwangmoment, rotatiehoek en de temperatuur in de pot nabij de afdichtring. Het moment/rotatiehoek diagram zal worden getekend. 5) Na het vereiste aantal cycli wordt het proefstuk verwijderd en geïnspecteerd, de elastomeerschijf mag niet uit de pot gedrukt zijn 6) Als geen defecten gedetecteerd zijn wordt de oplegging (het proefstuk) vervolgens in de drukmachine geplaatst samen met een wig, waardoor het tussenzadel (piston) in geroteerde toestand is geplaatst. Vervolgens wordt voor een periode van 168uur voor niet-metalen afdichtingen en 24uur voor metalen afdichtingen een drukkracht F₂ aangebracht, waarmee een elastomeer contactspanning van 60N/mm² wordt verkregen. 7) Installeren van apparatuur waarmee vervolgens de verticale verplaatsing van de oplegging wordt gemeten 8) Ontlasten van de oplegging in de zelfde mate waarmee de belasting is aangebracht 9) Vastleggen van alle verplaatsingen en belastingen gedurende de test 10) Na het uitvoeren van de test controleren of de elastomeerschijf niet uit de pot is gedrukt

Tabel 8: Procedure van de 'long term rotation and load test'

De resultaten van de test zijn acceptabel wanneer geen verdrijving van het elastomeer heeft plaatsgevonden en wanneer de vervorming onder de drukbelasting niet toegenomen is voor tenminste 24uur. In deze test is slijtage van de afdichting en kleurverandering van de smering acceptabel.

4.4. Kanttekeningen die worden gesteld aan de tests

Aangezien in de praktijk toch blijkt dat opleggingen slijtage vertonen, zullen een aantal parameters waarvan gebruik gemaakt wordt in de test, kritisch worden beoordeeld. Er kan in twijfel worden genomen of het gebruik maken van constante amplitudes, constante snelheden en krachten, en het toepassen van de voorgeschreven slijtwegen met een zekere lengte, in de hiervoor beschreven bewegingstesten juist is.

Om hier uitspraken over te kunnen doen, is het van belang inzicht te krijgen in de krachten, rotaties en translaties die opleggingen te verwerken krijgen. Deze krachten, rotaties en translaties worden veroorzaakt door belastingen die op de brug werken. De belastingen die in het kader van dit onderzoek worden beschouwd zijn verkeersbelastingen en thermische belastingen.

5. VERKEERSBELASTINGEN

5.1. Vrachtverkeer

Eén van de belastingen die in rekening gebracht zal worden, is de belasting ten gevolge van het verkeer op de brug. Voor dit onderzoek zal als verkeersbelasting alleen het vrachtverkeer in rekening worden gebracht. Verschillen in gewicht, asconfiguratie en wieltype hebben gezorgd voor een grote diversiteit aan vrachtwagentypen. Het is ondoenlijk om al deze typen vrachtwagens in rekening te brengen. Daarom zal gebruik worden gemaakt van een beperkt aantal vrachtwagentypen, welke representatief zijn voor het vrachtverkeer in Nederland. Als mogelijke indeling voor vrachtwagentypen zijn Europese voorschriften voor verkeersbelastingen (NEN-EN 1991-2) en verkeersmodellen van vrachtverkeer in Nederland beschouwd.

5.2. Europese voorschriften voor verkeersbelastingen (NEN-EN 1991-2)

In de NEN-EN 1991-2 zijn vijf vermoeiingsmodellen opgenomen, modellen van verkeer die zorgen voor vermoeiing van een brugconstructie. Van deze modellen is vermoeiingsmodel 4 gebaseerd op een verzameling van 'vijf standaard vrachtwagens' (tabel 9). De gezamenlijke belastingeffecten van deze standaard vrachtwagens, zal gelijk zijn aan die van het karakteristieke verkeer op de Europese wegen.

Vrachtwagentype	As afstand (m)	Aslast (kN)	Lange afstand - Aantal vrachtwagens (%)	Middellange afstand - Aantal vrachtwagens (%)	Lokaal verkeer - Aantal vrachtwagens (%)	Wieltype
	4.5	70	20.0	40.0	80.0	А
		130				В
Townson and the second s	4.20	70	5.0	10.0	5.0	А
A	1.30	120				В
0 00		120				В
	3.20	70	50.0	30.0	5.0	А
	5.20	150				В
0-0-000	1.30	90				С
	1.30	90				С
		90				С
	3.40	70	15.0	15.0	5.0	А
A	6.00	140				В
©° <u>~</u> ⊙⊃ '⊙⊙'	1.80	90				В
		90				В
J	4.80	70	10.0	5.0	5.0	A
	3.60	130				В
0.000	4.40	90				С
	1.30	80				С
		80				С

Tabel 9: Verzameling van gelijkwaardige vrachtwagens (tabel 4.7; NEN-EN 1991-2:2003)

Elke standaard vrachtwagen is gedefinieerd met:

- aantal assen
- as afstanden
- equivalente aslast
- wieltype
- wielafstand in dwarsrichting

De waarden van het aantal assen, as afstanden en de equivalente aslast zijn per type vrachtwagen opgenomen in tabel 9. In deze tabel is ook te zien dat er onderscheid wordt gemaakt in verschillende wieltypen. Ieder wieltype heeft zijn eigen contactoppervlak en de wielafstanden in dwarsrichting van de voertuigen verschillen. De Eurocode maakt onderscheid in drie wiel-/astypen (tabel 10).



Tabel 10: Omschrijving van wielen en assen (tabel 4.8; NEN-EN 1991-2:2003)

Op basis van deze indeling van vrachtwagentypen en hun bijbehorende wieltype, kunnen vermoeiingsberekeningen worden uitgevoerd. Voor dit onderzoek zijn deze vermoeiingsberekeningen niet van belang. De interesse gaat slechts uit naar de belastingen die voor de vrachtwagentypen in rekening worden gebracht. Echter, het betreft Europese voorschriften waarbij de vrachtwagentypen gezamenlijk representatief zijn voor het Europese verkeer. Verondersteld wordt dat een model dat representatief is voor het verkeer in Nederland, geschikter zal zijn voor dit onderzoek. Gebaseerd op de Europese voorschriften en verkeersmetingen in Nederland ontwikkelde A. Otte nieuwe verkeersmodellen.
5.3. Nationale modellen voor verkeersbelastingen

In het kader van het onderzoek naar rotaties en verplaatsingen van opleggingen van betonnen bruggen in Nederland, is het gewenst om gebruik te maken van een verkeersmodel die representatief is voor het verkeer in Nederland. Modellen die hiervoor in aanmerkingen komen, zijn ontwikkeld door Adriaan Otte.

Adriaan Otte ontwikkelde nieuwe vermoeiingsmodellen voor Rijkswaterstaat [1]. Een nauwkeurig vermoeiingsbelasting model was gewenst, om het resterende vermoeiingsleven van bruggen die 30 à 40 jaar geleden gebouwd zijn te kunnen evalueren en om gebruik van te kunnen maken voor het ontwerpen van nieuwe brugconstructies. Aan het te ontwikkelen model werden enkele eisen gesteld (tabel 11).

Eisen voor nieuwe vermoeiingsmodellen
1) Verkeerssituatie voor de volgende 100 jaar moet ingedekt zijn en model moet bruikbaar zijn voor:
- resterende vermoeiingssterkte (bestaande constructies)
 ontwerp vermoeiingssterkte (nieuwe constructies)
2) Realistische vrachtwagenconfiguraties
- klein aantal standaard vrachtwagens
- maximum belasting (totale massa en aslasten)
- toekomstige vrachtwagentypen
3) Astype spectra model gelijk aan astype spectra zoals gemeten
- het model moet overeenkomen met meetgegevens
4) Materiaal onafhankelijk
- bruikbaar voor verschillende materialen
5) Eenvoudig basis model wat gemodificeerd kan worden in een latere fase
- correctie factoren voor vrachtwagen massa, aslasten en aantal vrachtwagens
- verschillende as/wiel typen
6) Totale belasting die de brug passeert is equivalent aan de equivalente verkeersbelasting
- de belasting moet representatief zijn voor het verkeer op de Nederlandse wegen
7) Een conservatief model moet worden vermeden
- een conservatief model leidt tot kosten en onnodige reparaties, onnodig sluiten van constructies en
overdimensioneren van nieuwe constructies

 Tabel 11: Eisen voor de nieuwe vermoeiingsmodellen

Op basis van deze eisen zijn de volgende vier modellen ontwikkeld:

-	Reduced Eurocode fatigue load model 4	FLM 4
-	Fatigue load model M [100]	FLM M [100]
-	Fatigue load model M [75/25]	FLM M [75/25]
-	Fatigue load model M [75/20/5]	FLM M [75/20/5]

<u>FLM 4:</u> is gebaseerd op NEN-EN 1991-2 vermoeiingsmodel 4 en is gereduceerd op basis van gemiddelde waarden die volgden uit verkeersmetingen van de Moerdijkbrug. <u>FLM M modellen:</u> zijn alleen gebaseerd op metingen van de Moerdijkbrug. In deze modellen is gebruik gemaakt van 6 standaard vrachtwagens, wat de vrachtwagentypen zijn die tijdens de metingen zijn gedetecteerd. Het geen waar de drie FLM M modellen onderling van elkaar verschillen, is de grootte van de aslast (tabel 12). Het idee om dezelfde vrachtwagens per model te gebruiken met verschillende aslasten, volgt uit het principe om zo min mogelijk vrachtwagens te gebruiken voor het gelijkmaken van het aslast spectra (model overeen te laten komen met metingen).

FLM M modellen
FLM M [100]: Eén aslast voor alle vrachtwagens van het betreffende type
FLM M [75/25] Aslast voor 75% van de vrachtwagens is gebaseerd op de gemiddelde waarde van 85% van de gemeten ondergrens (laagste aslasten) Aslast voor 25% van de vrachtwagens is gebaseerd op de gemiddelde waarde van 15% van de gemeten bovengrens (hoogste aslasten)
FLM M [75/20/5] Aslast voor 75% van de vrachtwagens is gebaseerd op de gemiddelde waarde van 75% van de gemeten ondergrens (laagste aslasten) Alvast voor 20% van de vrachtwagens is gebaseerd op de gemiddelde waarde van 20% van de gemeten middengroep (hoge aslasten) Alvast voor 5% van de vrachtwagens is gebaseerd op de gemiddelde waarde van 5% van de gemeten bovengrens (extreem hoge aslasten)

 Tabel 12: Aslast grootte voor de FLM M modellen

De FLM 4 en FLM M [100] zijn modellen die bestaan uit standaard vrachtwagens met één gemiddelde aslast voor elke configuratie. Dit heeft als gevolg dat de hogere en lagere vrachtwagenmassa's niet in het spectra zijn opgenomen, zoals wel het geval is in de FLM M [75/25] en FLM M [75/20/5].

FLM M [75/25] wordt gezien als de beste optie voor staalconstructies, omdat dit model niet zo conservatief is en ook de hogere aslasten bevat. Voor betonnen constructies kan de nog wat minder conservatieve FLM M [75/20/5] een betere oplossing zijn, omdat de hoogste aslasten in dit model opgenomen zijn. Voor staal zijn de spanningsvariaties belangrijk, voor beton gaat de aandacht meer uit naar het maximum spanningsniveau.

In dit onderzoek gaat de aandacht niet uit naar maximale spanningen in de betonnen brugconstructie, maar naar de krachten, verplaatsingen en rotaties die de opleggingen te verwerken krijgen. Daarnaast is het voor dit onderzoek van belang gebruik te maken van een verkeersmodel, die representatief is voor het verkeer op de Nederlandse wegen. Op basis van deze vereisten, is besloten om gebruik te maken van FLM M [75/25] als verkeersbelasting model. De zes standaard vrachtwagens met bijbehorende waarden voor aslasten, asafstanden en wieltypen van het FLM M [75/25] model zijn opgenomen in tabel 13. Dit model bestaat dus uit 12 vrachtwagentypen, gebaseerd op een beladen en onbeladen standaard vrachtwagen.

vrachtwagen		á	as wiel		aslast totale l (kN) (kN)		le last (N)	aantal vra (per	chtwagens jaar)	totale last (per jaar)		
type	massa	massa	aantal	afstand	type	laagste	hoogste	75%	25%	75%	25%	(kN)
V11	10	4	2	5 20	Δ	50	80	110	195	225000	75000	30352125
VII	10	4	2	5.20	R	60	115	110	155	223000	75000	55552125
V12	10	7	3	3.80	Δ	75	100	205	355	225000	75000	72750000
• = =	10	,	5	1.30	В	75	140	205	555	223000	/ 5000	12/30000
				1.50	B	55	115					
T1102	15	10	4	3.80	A	70	80	205	315	337500	112500	104740875
	10		•	6.60	В	55	95	200	010	007000	112000	101710070
				1.30	C	40	70					
					C	40	70					
T11O3	50	53	5	3.80	A	70	90	300	530	1125000	375000	536431875
				5.60	В	80	140					
				1.30	С	50	100					
				1.30	С	50	100					
					С	50	100					
V12A12	5	7	6	4.20	А	85	105	445	660	112500	37500	74856750
				1.30	В	100	145					
				4.20	В	70	110					
				3.80	С	70	110					
				1.30	С	60	95					
					С	60	95					
T12O3A2	10	19	8	2.80	А	70	90	545	890	225000	75000	189492000
				1.30	В	60	105					
				5.60	В	85	135					
				1.30	С	70	120					
				1.30	С	70	120					
				4.20	С	70	120					
				1.30	С	60	100					
					С	60	100					
	Tabel 1	3: Fatigu	ie Load I	Model M	1 [75/2]	51				2250000	750000	1017623625

5.4. Vrachtwagen positie op de brug

Uit het FLM M [75/25] model volgt dat we te maken hebben met vrachtwagens, voorzien van wieltypen A, B of C. Voor deze wieltypen geldt altijd een hart op hart afstand van 2m (tabel 10). Voor de positie van de vrachtwagen binnen de rijstrook, worden twee aannamen gedaan. Ten eerste zal er van uit worden gegaan dat een vrachtwagen in een rechte lijn rijdt en niet van deze lijn af zal wijken. Ten tweede wordt aangenomen dat de vrachtwagen zich in het midden van de rijstrook bevindt.



Figuur 19: Positie van een vrachtwagen binnen de rechter rijstrook

Op basis hiervan is de positie van de vrachtwagen binnen de rijstrook vastgesteld. De vrachtwagen rijdt in een rijstrook van 3250m breed, exclusief belijning. Aan beide zijden van het hart van de wiel tot aan de belijning zal 0.625m resteren (figuur 19).

5.5. Verkeerssimulatie

In het voorgaande verkeersmodel FLM M [75/25] zijn de verschillende vrachtwagentypen beschreven. Deze vrachtwagentypen kunnen als belasting op de brug worden aangebracht. In eerste instantie zal gekeken worden naar de response ten gevolge van een individuele vrachtwagen. In een vervolg stadium zal de interesse uit gaan naar de response van de brug ten gevolge van meerdere vrachtwagens achter elkaar. In hoofdstuk 9 is geconstateerd dat de volgafstand en het aantal vrachtwagens dat zich op hetzelfde tijdstip op de brug bevinden, een enorme invloed hebben op de resultaten. Het is daarom zinvol om te weten welke volgafstanden zich in de praktijk voordoen en welk aantal vrachtwagens zich tegelijkertijd op de brug bevinden. Een verkeerssimulatie zou hiervoor kunnen volstaan.

Echter, het bepalen van waarden voor bijvoorbeeld volgafstanden die zich in de praktijk voor zouden doen, vergt een gedetailleerde nauwkeurige simulatie over een tijdsinterval van enkele minuten. Het model FLM M [75/25] is beperkt tot intensiteiten met betrekking tot een tijdsduur van 1 jaar. Aangezien geen gedetailleerde gegevens beschikbaar zijn van de intensiteit van de verschillende vrachtwagentypen uit het verkeersmodel FLM M [75/25], is besloten geen verkeerssimulatie uit te voeren.

Wanneer men besluit dit onderzoek voort te zetten en gedetailleerde gegevens heeft verkregen met betrekking tot verkeersintensiteiten, kan voor een verkeerssimulatie gebruik worden gemaakt van het verkeerssimulatiemodel FOSIM (Freeway Operations SIMulation). In dit simulatiemodel wordt het gedrag van een verkeersstroom gesimuleerd tot op het niveau van individuele bestuurders/voertuigelementen. Bestuurderselementen en voertuigelementen zoals voertuiglengte, versnelling snelheid, remsnelheid, snelheid en parameters voor het volggedrag zijn in het model opgenomen. Een impressie van dit model is te zien in figuur 20.



Figuur 20: Screenshot FOSIM simulatie model

6. THERMISCHE BELASTINGEN

6.1. Thermische invloeden

In een constructie die bloot gesteld is aan natuurlijke klimatologische omstandigheden, zal uitwisseling plaatsvinden van thermische energie. Factoren die invloed hebben op de uitwisseling van thermische energie [3] zijn:

- luchttemperatuur
- windsnelheid
- zonnestraling (direct en diffuus)
- reflectie van zonnestraling
- atmosferische thermische straling
- thermische straling van de aardse omgeving
- reflectie van de atmosferische thermische straling
- thermische straling van het constructieoppervlak
- verdamping en condensatie aan het constructieoppervlak



Figuur 21: Thermische invloeden

Dagelijkse en seizoengebonden variaties van de thermische invloeden, leiden tot variaties van de temperatuurverdeling in de brugconstructie. In de volgende paragraaf wordt beschreven hoe de (belangrijkste) thermische invloeden in rekening gebracht kunnen worden, wanneer gebruik gemaakt wordt van de Eurocode.

6.2. Europese voorschriften voor thermische belastingen

De "NEN-EN 1991-1-5: Algemene belastingen – Thermische belastingen" schrijft voor dat de temperatuurverdeling binnen een afzonderlijk constructief element mag zijn gesplitst in de volgende vier essentiële samenstellende componenten [4], zoals geïllustreerd in onderstaande figuur:

- a) gelijkmatige temperatuur component, ΔT_u
- b) lineair veranderlijke temperatuur verschilcomponent om de z-z as, ΔT_{MY}
- c) lineair veranderlijke temperatuur verschilcomponent om de y-y as, ΔT_{MZ}
- d) niet-lineaire temperatuurverschilcomponent, ΔT_{E}



Figuur 22: Splitsing van de temperatuurverdeling in vier componenten

De jaarlijkse temperatuurwisseling worden toegeschreven aan de uniforme temperatuurverdeling over de doorsnede en dagelijkse temperatuurwisselingen worden toegeschreven aan de veranderlijke (lineaire en niet-lineaire) temperatuurverdeling over doorsnede.

In de NEN-EN 1991-1-5 is tevens een artikel opgenomen hoe omgegaan kan worden met thermische belastingen voor bruggen, artikel 6 "temperatuurveranderingen in bruggen". Binnen dit artikel wordt onderscheid gemaakt in drie verschillende brugdektypen. Voor dit onderzoek is alleen "dektype 3 betonnen dek" van belang, welke vervolgens onderverdeeld is in platen, liggers en kokerliggers.

In dit artikel wordt tevens beschreven hoe de spanningscomponenten bepaald en gecombineerd in rekening gebracht dienen te worden. Hierna zullen achtereenvolgens worden toegelicht;

- gelijkmatige temperatuurcomponent (ΔT_u)
- verticale temperatuurverschilcomponent (zowel lineair ΔT_{MZ} als niet-lineair ΔT_E)
- horizontale temperatuurverschilcomponent (lineair ΔT_{MY})

Gelijkmatige temperatuurcomponent

De gelijkmatige temperatuurcomponent hangt af van de minimum- en maximumtemperatuur die een brug zal bereiken. De karakteristieke waarde van het maximumbereik van de gelijkmatige temperatuurcomponent voor de verkorting van de brug is gelijk aan:

 $\Delta T_{N,con} = T_0 - T_{e,min}$

De karakteristieke waarde van het maximumbereik van de gelijkmatige temperatuurcomponent voor de uitzetting van de brug is gelijk aan: $\Delta T_{N,exp} = T_{e,max} - T_0$

Het totale bereik van de gelijkmatige temperatuur component van de brug is: ΔT_N = $T_{e,max}$ – $T_{e,min}$

De aanvangstemperatuur van de brug T_0 is de temperatuur op het ogenblik dat de vervorming van de constructie wordt gehinderd. Bijlage A.1 (3) uit NEN-EN 1991-1-5 schrijft voor dat de aanvangstemperatuur T_0 gelijk behoort te zijn genomen aan de temperatuur van een constructief element in de fase waarin de vervorming is belemmerd (eindmontage). Indien dit niet voorspelbaar is, behoort de gemiddelde temperatuur tijdens de uitvoeringsperiode te zijn genomen. De nationale bijlage schrijft een waarde voor de aanvangstemperatuur voor.

 $T_0 = 10^{\circ}C.$

Karakteristieke waarden van de minimum- en maximumluchttemperaturen in de schaduw T_{min} en T_{max} voor de locatie, moeten beschikbaar zijn uit bijvoorbeeld nationale kaarten of isothermen. De nationale bijlage schrijft voor dat de minimum- en maximumluchttemperaturen in de schaduw voor het gehele grondgebied van Nederland toegepast moet zijn, zoals gegeven in tabel 5.2 uit NEN-EN 1991-1-5/NB.

 $T_{max} = 30^{\circ}C$ $T_{min} = -25^{\circ}C$

De waarden voor de minimale en maximale gelijkmatige temperatuurcomponent van de brug $T_{e,max}$ en $T_{e,min}$, moeten worden afgeleid van de minimum- en maximumluchttemperaturen in de schaduw T_{min} en T_{max} . Hiervoor dient gebruikt gemaakt te worden van figuur 6.1 uit NEN-EN 1991-1-5/NB, die gegeven is in figuur 23 op de volgende bladzijde. Aflezen in deze figuur voor dektype 3 (betonnen dek) geeft de onderstaande waarden.

 $T_{e,max} = T_{max} + 2 = 30 + 2 = 32^{\circ}C$ $T_{e,min} = T_{min} + 8 = -25 + 8 = -17^{\circ}C$



Figuur 23: Correlatie tussen de minimum-/maximumluchttemperatuur in de schaduw (T_{min}/T_{max}) en de minimale/maximale gelijkmatige temperatuurcomponent van de brug $(T_{e,min}/T_{e.max})$ (figuur 6.1; NEN-EN 1991-1-5:2003/NB:2009 Ontw).

Maximumbereik van de gelijkmatige temp. component voor de verkorting van de brug: $\Delta T_{N,con} = T_0 - T_{e,min} = 10 - (-17) = 27^{\circ}C$

Maximumbereik van de gelijkmatige temp. component voor de uitzetting van de brug: $\Delta T_{N,exp} = T_{e,max} - T_0 = 32 - 10 = 22^{\circ}C$

Het maximumbereik van de gelijkmatige temperatuurcomponent over de hoogte van de doorsnede (figuur 24) zal in rekening worden gebracht. Dit is representatief voor de seizoensgebonden temperatuurwisseling, waarbij de maximale uitzetting in de zomer en de maximale verkorting in de winter plaats vindt.



Figuur 24: Maximumbereik van de gelijkmatige temperatuurcomponent voor uitzetting (links) en verkorting (rechts)

Verticale temperatuurverschilcomponent

Opwarming en de afkoeling van de bovenzijde van een brugdek resulteren in een maximumtemperatuursverandering bij opwarming (bovenzijde warmer) en een maximumtemperatuursverandering bij afkoeling (onderzijde warmer). Dit temperatuurverschil over de hoogte van de doorsnede dient in rekening te worden gebracht. NEN-EN 1991-1-5/NB schrijft voor dat hiervoor gebruik gemaakt dient te worden van benadering 2 volgens NEN-EN 1991-1-5 art. 6.1.4.2. De waarden voor de verticale temperatuurverschillen Δ T voor bruggen met een betonnen dek moeten zijn ontleend aan onderstaande tabel (NEN-EN 1991-1-5/NB, figuur 6.2.c). Het temperatuurverschil Δ T bevat zowel de lineair component Δ T_{MZ} als de niet-lineaire component Δ T_E.

Constructionums	Temperatuurverschil (∆T)					
Constructietype	(a) Opwarming	(b) Afkoeling				
100mm bedekking	$h_{\frac{h_{1}}{h_{2}}} \qquad \Delta T, \\ h_{\frac{h_{3}}{h_{3}}} \qquad \Delta T_{3}$	ΔT_{1} ΔT_{2} h_{1} h_{2} h_{3} h_{4} h_{4} h_{5} h_{4}				
3b. Betonnen liggers	$\begin{array}{l} h_1 = 0,3 \ h \ \text{maar} \leq 0,15 \ \text{m} \\ h_2 = 0,3 \ h \ \text{maar} \geq 0,10 \ \text{m} \\ \text{maar} \leq 0,25 \ \text{m} \\ h_3 = 0,3 \ h \ \text{maar} \leq (0,10 \ \text{m} + \\ \text{slijtlaagdikte in m}) \\ (\text{voor deze platen wordt} \ h_3 \\ \text{begrensd door} \ h - h_1 - h_2 \) \end{array}$	h ₁ = h ₄ = 0,20 h maar ≤ 0,25 m h ₂ = h ₃ = 0,25 h maar ≤ 0,20 m				
100mm bedekking h 3c. Betonnen kokerligger	$\begin{array}{c c c c c c c c c c c c c c c c c c c $	$\begin{array}{c ccccccccccccccccccccccccccccccccccc$				

Tabel 14: Temperatuurverschillen voor dektype 3: betonnen dekken (figuur 6.2.c; NEN-EN 1991-1-5:2003/NB:2009 Ontw)

In voorgaande figuur verwijst 'opwarming' naar omstandigheden waarbij zonnestraling en andere oorzaken een temperatuurtoename veroorzaken door de toplaag op het brugdek. 'Afkoeling' verwijst naar omstandigheden waarbij warmte door de toplaag op het brugdek wordt afgegeven door straling en andere oorzaken. We spreken bij opwarming over een temperatuurverschil ΔT_{heat} en bij afkoeling over een temperatuurverschil ΔT_{cool} . Daarnaast is in voorgaande figuur te zien dat de temperatuurverschilprofielen geldig zijn voor een slijtlaag met een dikte van 100mm. Deze slijtlaag heeft invloed op de temperatuur van de betondoorsnede. Slijtlagen worden toegepast op betonnen bruggen om een veilig stroef oppervlak te creëren voor het verkeer en om het onderliggende betonoppervlak te beschermen tegen aantasting door dooizouten.

De nationale bijlage geeft waarden voor de temperatuurverschilprofielen voor andere slijtlaagdikten. Voor dektype 3 betonnen dek schrijft NEN-EN 1991-1-5/NB de waarden voor, zoals gegeven in onderstaande tabel (NEN-EN1991-1-5/NB tabel B.3).

Dikto von do	Dikto von do			Temperat	uurverschil				
Dikte van de			Opwarming	g	Afkoeling				
plaat (II)	Siljtidag	ΔT_1	ΔT_2	ΔT_3	ΔT_1	ΔT_2	ΔT_3	ΔT_4	
m	mm	°C							
	Zonder slijtlaag	20	13	0	-8	-3.5	0	0	
0,4	50	15	7	0	-6.5	-3.5	0	0	
	100	10	7	0	-5	-3	0	0	
	Zonder slijtlaag	20	9.5	0	-8	-3.5	0	0	
0,6	50	15	7	0	-6.5	-3.5	0	0	
	100	10	5	0	-5	-3	0	0	
	Zonder slijtlaag	20	9.5	0	-8	-3.5	0	0	
0,8	50	15	7	0	-6.5	-2.5	0	0	
	100	10	4.5	0	-5	-2.5	0	0	
	Zonder slijtlaag	20	9.5	0	-8	-2.5	0	0	
1,0	50	15	7	0	-6.5	-2.0	0	0	
	100	10	4.5	0	-5	-1.5	0	0	
	Zonder slijtlaag	20	9.5	0	-8	-1.0	0	0	
1,5	50	15	7	0	-6.5	-1.0	0	0	
	100	10	4.5	0	-5	-0.5	0	0	

Tabel 15: Waarden voor ∆T voor dektype 3 (tabel B.3; NEN-EN 1991-1-5:2003/NB:2009 Ontw)

De westbrug van de Dintelhavenbruggen is een eencellige betonnen kokerligger, waarvoor de temperatuurverschillen van dektype 3 in rekening kunnen worden gebracht. Op de brug is een slijtlaag (ZOAB 50mm + STAB 50mm + DAB 40mm) van 140mm aanwezig. De hoogte van de koker verloopt van 3m bij de landhoofden tot 8.5m bij de tussensteunpunten.

In tabel 15 is te zien dat er slechts waarden voor de temperatuurverschillen ΔT worden gegeven voor een koker met een hoogte van 1.5m met daarop een slijtlaag van 100mm. Voor de hoogten van 0.8m, 1.0m en 1.5m zijn de gegeven temperatuurverschillen voor opwarming gelijk. Hetzelfde geldt voor de waarde van ΔT_1 voor het temperatuurverschil bij afkoeling. Op basis hiervan wordt aangenomen dat voor betonnen kokers met een grotere doorsnede hoogte, de temperatuurverschillen voor een hoogte van 1.5m in rekening kunnen worden gebracht. De waarde voor het temperatuurverschil ΔT_2 is hierin een uitzondering.

De waarde voor ΔT_2 gaat naar -0.5 voor kokers met een doorsnede hoogte die groter is dan 1.5m. De waarden voor de temperatuurverschillen die op basis van de voorgaande aannamen worden gevonden zijn vermeld in tabel 16.

Om de waarden te bepalen voor de dikkere slijtlaag van 140mm, zal lineair worden geëxtrapoleerd. De waarden die met extrapoleren zijn bepaald en uiteindelijk in rekening zullen worden gebracht, zijn tevens vermeld in tabel 16.

Dikto van de	Dikto von do	Temperatuurverschil							
plaat (b)	sliitlaag		Afkoeling						
plaat (n)	Siljtidag	ΔT_1	ΔT_2	ΔT_3	ΔT_1	ΔT_2	ΔT_3	ΔT_4	
m	mm	°C	°C	°C	°C	°C	°C	°C	
	Zonder slijtlaag	20	9.5	0	-8	-1.0	0	0	
Variabel (>1.5m)	50	15	7	0	-6.5	-1.0	0	0	
	100	10	4.5	0	-5	-0.5	0	0	
Variabel (>1.5m)	140	6	2.5	0	-3.8	0	0	0	

Tabel 16: Temperatuurverschillen op basis van aannamen voor de doorsnede hoogte, gevolgd door de waarden die in rekening worden gebracht na extrapolatie voor de slijtlaag

Het verloop van de temperatuurverschillen over de hoogte van de doorsnede voor opwarming en afkoeling zijn gegeven in figuur 25. Uit tabel 14 volgt dat de begrensde waarden $h_1 = 0.15m$ en $h_2 = 0.25m$ voor opwarming en $h_1 = 0.25m$ voor afkoeling gelden, aangezien de hoogte h van de doorsnede varieert van 3m tot 8.5m.



Figuur 25: Temperatuurverschilcomponenten voor opwarming (links) en afkoeling (rechts)

Horizontale temperatuurverschilcomponent

De nationale bijlage schrijft voor dat een horizontale temperatuurverschilcomponent in rekening gebracht moet worden, indien langdurige zonbestraling kan optreden. De waarde en methode voor het temperatuurverschil in horizontale richting die gevolgd moet worden, is gelijk aan de procedure voor het verticale temperatuurverschil van een betonnen dek zonder slijtlaag.

Aangezien de wanden van de westbrug van de Dintelhavenbruggen niet langdurig door de zon worden bestraald, zal geen horizontale temperatuurverschilcomponent in rekening worden gebracht. De westbrug en oostbrug liggen direct naast elkaar, zodat één zijde van de koker altijd in de schaduw gelegen is. Daarnaast zorgen de brede bovenflens en de ligging van de brug er voor dat de wand aan de andere zijde niet langdurig door de zon wordt bestraald.

6.3. Thermische belasting

Met behulp van de Eurocode is nu bekend welke temperatuurwisseling in een jaar en op een dag plaats vindt (zie figuur 24 en 25). Hierbij dient opgemerkt te worden dat met name de dagelijkse temperatuurwisseling in werkelijkheid sterk kan variëren. Op een zonnige dag zullen uiteraard andere temperaturen heersen dan op een bewolkte of regenachtige dag.

Als temperatuurwisseling tussen de uiterste waarden in een jaar ($\Delta T_{N,con}$ en $\Delta T_{N,exp}$) en de uiterste waarden op een dag ($\Delta T_{afkoeling}$ en $\Delta T_{opwarming}$) wordt meestal een sinusvormig verloop aangenomen. Het verloop is bepalend voor de snelheid waarmee de verplaatsingen als gevolg van temperatuurveranderingen op zullen treden. Aangezien de snelheid waarmee deze verplaatsingen optreden erg laag zal zijn, gaat de interesse slechts uit naar de verplaatsingen die de temperatuurverandering veroorzaakt. Daarom zullen alleen de uiterste waarden op een dag en in een jaar worden beschouwd.

7. EINDIGE ELEMENTEN MODEL DINTELHAVENBRUG (1)

7.1. Eindige elementen software

Voor het modelleren van de brug is gebruik gemaakt van het eindige elementen pakket Midas CIVIL 2010 v2.1. Met deze software is een eindige elementen model gemaakt van de Dintelhavenbrug, waarop belastingen ten gevolge van verkeer en temperatuur aangebracht kunnen worden. De elementen die voor het model zijn gebruikt, de manier waarop belastingen aangebracht worden en statische en dynamische analyses zijn uitgevoerd voor het verkrijgen van de gewenste resultaten zijn in dit hoofdstuk beschreven. De verificatie van het model en de onderbouwing van keuzes die zijn gemaakt voor methoden en parameters van het rekenproces, worden in het volgende hoofdstuk toegelicht.

7.2. Modelleren van de betonconstructie

De betonconstructie van de brug zal opgebouwd worden uit volume elementen. Wanneer gebruik gemaakt zou worden van schaal elementen, wordt slechts de hartlijn van de doorsnede gedefinieerd. Dit heeft als gevolg dat de opleggingen niet exact aan de onderrand van de doorsnede gedefinieerd worden, maar ook ten hoogte van de hartlijn. De gevonden resultaten die bij de opleggingen optreden moeten vervolgens worden aangepast. Het gebruik van volume elementen zorgt er voor dat deze bewerking niet nodig is. Tevens is het met volume elementen mogelijk om de geometrie van de gehele brug exact te definiëren.

Volume elementen waarvan gebruik gemaakt is, zijn elementen met 6 knopen (wedges) en elementen met 8 knopen (hexahedron).





Figuur 27: 6 knopen element (wedge)

Aan de volume elementen dienen materiaal eigenschappen toegewezen te worden. De materiaal eigenschappen zijn gerelateerd aan de betonkwaliteit B85:

- elasticiteitsmodulus: $E = 3.93 \cdot 10^7 kN/m^2$
- poisson ratio: v = 0.2
- eigen gewicht $\rho = 25.5 \text{kN/m}^3$

De brug is gemodelleerd als lineair elastisch materiaal, gebaseerd op de aanname dat de gewapende voorgespannen betonnen uitbouwbrug ongescheurd is. De voorspankabels en het wapeningstaal zullen niet in het model worden opgenomen.

7.3. Modelleren van de opleggingen

Het exact modelleren van de geometrie en eigenschappen van een oplegging is enorm complex. Daarnaast is het, gezien het grote verschil in afmetingen tussen de brug en de opleggingen, niet eenvoudig een bruikbaar model te verkrijgen waarin zowel de opleggingen als de gehele brug in een gewenst detailniveau zijn opgenomen.

Een detail als het effect van de speling van ongeveer 1mm tussen de geleiding en de sparing in de deksel, zal niet in het model worden opgenomen. Dit heeft als gevolg dat in het model direct een oplegreactie kan ontstaan, die in werkelijkheid misschien niet direct plaats vindt. In de praktijk moet deze speling eventueel eerst worden overbrugd, afhankelijk van de zijde van de geleiding die op dat moment aanligt. Andere eigenschappen die complex zijn om te modelleren zijn de lokale demping van een oplegging en de wrijving tussen glijvlakken. In Midas CIVIL kan voor deze eigenschappen gebruik gemaakt worden van een zogenaamde 'Friction Pendulum System Isolator' (FPS Isolator). In het eindige elementen model kan een 'general link' element worden opgenomen, waaraan de eigenschappen van de FPS Isolator zijn toegewezen. Om inzicht te krijgen in de werking van de FPS Isolator is een 'general link' element toegepast in een eenvoudig 1D en 3D liggermodel. De resultaten van deze eenvoudige modellen en een bijbehorende analytische berekening zijn opgenomen in bijlage B. Geconcludeerd kan worden dat het element toepasbaar is voor het modelleren van wrijving tussen de glijvlakken van brugopleggingen. Echter, het vaststellen van de waarden voor parameters voor effectieve stijfheden en niet lineaire stijfheid gebeurd op iteratieve wijze. De resultaten die volgen uit een model waarin een FPS Isolator is opgenomen, dienen daarom kritisch te worden beoordeeld.

De geometrie van de opleggingen zal vereenvoudigd worden gemodelleerd. Het modelleren van de oplegging zal beperkt blijven tot een stijf vlak rond om een knoop die het hart van de bovenzijde van de oplegging representeert, waaraan een staafelement is bevestigd. Het achterwegen laten van dit staafelement zou betekenen dat voor het verkrijgen van de gewenste resultaten na het uitvoeren van een dynamische analyse, eerst een sommatie van lokale knoopkrachten uitgevoerd moet worden. Het staafelement geeft de mogelijkheid om de krachten, verplaatsingen en rotaties van een oplegging direct in 1 knoop op te vragen.

De opleggingen van steunpunt 1 en 4 hebben een verstijfd oppervlak van 2x1m² en de opleggingen van steunpunt 2 en 3 hebben een verstijfd oppervlak van 1x1m². Het verstijfde oppervlak is opgebouwd uit vier plaatelementen. Dit oppervlak is representatief voor het oppervlak van de bovenzijde van de werkelijke oplegging en wapening in de betonconstructie rondom de oplegging die voor stijfheid zorgt. Aan de knoop waar de vier plaatelementen samen komen is vervolgens een staafelement verbonden, waarvan de richting van de lokale lengte as gelijk is aan de richting van de globale z as. Aangezien de oplegging als heel stijf wordt geacht is een elasticiteitsmodulus van $E = 1.0 \cdot 10^{16} \text{kN/m}^2$ toegewezen aan de plaat- en staafelementen. Of de aanwezigheid van de elementen invloed heeft op het gedrag van de brug wordt in het volgende hoofdstuk onderzocht.

De vrijheidsgraden van een oplegging zijn toegewezen aan de knoop aan het andere uiteinde van het staafelement. De knopen die corresponderen met de opleggingen hebben de onderstaande vrijheidsgraden toegewezen gekregen, waarbij 1 gelijk is aan 'vast' en 0 gelijk is aan 'vrij' (assenstelsel, zie figuur 30).

Oplegging	Steunpunt	Кпоор	Dx	Dy	Dz	Rx	Ry	Rz
w.1.a	1	55501	0	0	1	0	0	0
w.1.b	1	55502	0	1	1	0	0	0
w.2.a	2	55503	1	0	1	0	0	0
w.2.b	2	55504	1	1	1	0	0	0
w.3.a	3	55505	0	0	1	0	0	0
w.3.b	3	55506	0	1	1	0	0	0
w.4.a	4	55507	0	0	1	0	0	0
w.4.b	4	55508	0	1	1	0	0	0

 Tabel 17: Vrijheidsgraden toegewezen aan knopen die corresponderen met de opleggingen

Voor het berekenen van de verplaatsingen, rotaties en oplegreacties ten gevolge van verkeer ter hoogte van de representatieve knopen, zal zowel gebruik gemaakt worden van statische belastingen als dynamische belasting. De thermische belastingen die in rekening worden gebracht, zijn toegelicht in hoofdstuk 11.

7.4. Statische belasting

Voor het toepassen van statische belastingen als simulatie van verkeer, wordt gebruik gemaakt van puntlasten die in knopen zijn aangebracht. Een puntlast representeert een wiellast van een vrachtwagen en twee puntlasten naast elkaar representeren een aslast. Met behulp van de resultaten voor verplaatsingen, rotaties en oplegreacties ten gevolge van een aslast kan door middel van sommatie de resulterende verplaatsingen, rotaties en oplegreacties ten gevolge van vrachtwagentypen worden bepaald. Aangezien hierbij alleen de interesse uit gaat naar resultaten ten gevolge van verkeersbelasting, is het aanbrengen van gelijkmatige verdeelde belasting voor het modelleren van asfalt, ballastbeton en overige toebehoren op de brug niet noodzakelijk.

7.5. Dynamische belasting

Voor het simuleren van de verkeersbelasting voor een dynamische analyse dient de belasting tijdsafhankelijk te worden gemaakt. Hierbij wordt gebruik gemaakt van tijdsfuncties en aanvangstijden die aan zogenaamde dynamische knopen worden gerelateerd. Ter verduidelijking wordt hier als voorbeeld de knoop ter hoogte van snede tien gegeven. Op de dynamische knoop ter hoogte van deze snede zal een kracht aangrijpen, wanneer een wiellast ter hoogte van het element vóór en het element na deze snede rijdt. Dat is het geval als het wiel zich op het rijdek bevindt boven de donker gekleurde elementen (figuur 28).



Figuur 28: Wiellast ter hoogte van snede 10

De belasting op de dynamische knoop ter hoogte van snede tien zal lineair toenemen van nul tot de waarde van de wielbelasting en vervolgens weer lineair afnemen tot nul wanneer de wiellast de snede heeft gepasseerd. De snelheid van deze lineaire toename en afnamen hangt af van de snelheid van de vrachtwagen en de lengte van de elementen voor en na de snede die wordt beschouwd. De elementen voor en na snede tien die hier als voorbeeld wordt beschouwd, hebben een lengte van 5m en een gekozen eenheidslast van 0.5kN rijdt met een aangenomen snelheid van 80km/h.



Figuur 29: Tijdfunctie voor de dynamische knoop ter hoogte van snede 10

In figuur 29 is de tijdfunctie voor de dynamische knoop ter hoogte van snede 10 gegeven die met deze waarden wordt gevonden. Op deze wijze is voor iedere dynamische knoop een bijbehorende tijdfunctie gedefinieerd. In de dynamische analyse worden deze tijdfunctie en dus de belasting op een bepaald tijdstip aan de dynamische knoop toegewezen. Dit tijdstip is de aankomsttijd van de last ter hoogte van het begin van het element die vooraf gaat aan de te beschouwen snede van de dynamische knoop. In de dynamische analyse wordt naast verkeersbelasting ook het eigen gewicht van de brug in rekening gebracht. Onder het eigen gewicht van de brug wordt verstaan, het eigen gewicht van de betonconstructie, asfalt, ballastbeton en overige brugvoorzieningen. Het eigen gewicht van de betonconstructie wordt door het programma in rekening gebracht. Het eigen gewicht van het asfalt en het ballastbeton is als gelijkmatige verdeelde belasting aangebracht. Belasting ten gevolge van overige voorzieningen zijn buiten beschouwing gelaten. De dynamische belasting wordt gebruikt tijdens dynamische analyses; modal analysis en transient response analysis.

7.6. Modal analysis

Een modal analysis is een dynamische analyse voor het bepalen van de eigenmodes en eigenfrequenties van een constructie. De eigenfrequenties zijn alleen afhankelijk van de stijfheid en massa van de brug en dus niet van de belasting die op de brug werkt. Na het uitvoeren van een modal analysis kan worden geanalyseerd of de frequentie die door een aangrijpende belasting wordt veroorzaakt, overeen komt met een eigenfrequentie van de brug. Wanneer de frequenties overeenkomen of dicht bij elkaar liggen, kan de belasting zorgen voor trillingen in de constructie.

Daarnaast geeft een modal analysis door middel van massaparticipaties, inzicht in welke modes relevant zullen zijn voor de dynamische response van de brug. Wanneer een gesommeerde massaparticipatie is bereikt van ver beneden de 100%, betekent dit dat er modes achterwegen zijn gelaten die weldegelijk een significante invloed kunnen hebben op de uiteindelijk dynamische response van de brug. De eigenmodes worden immers gebruikt bij de model superposition method in de transient response analysis, zoals toegelicht in de volgende paragraaf.

Binnen de model analysis zijn er twee mogelijkheden om eigenmodes te berekenen. Met een eigenwaarden analyse kunnen de 'exacte' eigenfrequenties van de brug worden bepaald, met een Ritz analyse worden lineair geïnterpoleerde eigenfrequenties berekend. Voor grote constructies blijkt dat bij het gebruik maken van een eigenwaarden analyse, honderden modes nodig zijn om 90 procent aan massaparticipatie te verkrijgen voor een bepaalde vrijheidsgraad. In zulke gevallen is een Ritz analyse efficiënter [7]. De eigenmodes in een Ritz analyse worden bepaald op basis van de dynamische belasting, waardoor alleen modes worden berekend die relevant zijn. Op deze wijze kan met een aanzienlijk lager aantal modes een hoge massaparticipatie worden bereikt en vervolgens een dynamische response worden berekend. Dit zal zorgen voor een aanzienlijk kortere rekentijd.

7.7. Transient response analysis

Een variërende belasting in de tijd op de brug, zal per tijdstip verplaatsingen, spanningen en rekken veroorzaken. Met een dynamische analyse, de zogenaamde transient response analysis, kunnen de krachten, verplaatsingen en rotaties als gevolg van een variërende belasting in de tijd worden bepaald. De demping en traagheid van de brug spelen hierin een belangrijke rol. Voor het uitvoeren van een transient analysis geeft Midas CIVIL twee mogelijke oplossingsmethoden; modal superposition en directe integratie.

De modal superposition methode heeft als uitgangspunt dat de response van de constructie bepaald kan worden door het sommeren van een aantal lage eigenfrequenties van de constructie. Dit heeft als voordeel dat er relatief weinig vergelijkingen nodig zijn, maar als nadeel dat het resulteert in een benadering van de oplossing. Hoe meer modes worden gesommeerd hoe groter het percentage van de gezamenlijke massaparticipatie zal zijn en des te nauwkeuriger de exacte oplossing benaderd wordt.

Directe integratie is een methode waarbij zoals de naam al zegt, gebruik gemaakt wordt van directe integratie van het gehele stelsel van vergelijkingen. Dit vereist veel tijdstappen met een complete oplossing voor iedere tijdstap, wat zorgt voor een relatief lange rekentijd. In Midas CIVIL wordt voor het integratieschema gebruik gemaakt van de Newmark integratie. Dit is een numerieke integratiemethode die gebruikt wordt voor het oplossen van de differentiaalvergelijkingen. De Newmark integratiemethode kent twee parameters γ en β , waaraan een waarde kan worden toegewezen die $0 \le n \le 1$.

In Midas CIVIL is op basis van deze parameters onderscheid gemaakt in:

- constante acceleratie methode ($\gamma = 0.5 \text{ en } \beta = 0.25$): aangenomen wordt dat de versnelling van een constructie onveranderd blijft gedurende het tijdsinterval van iedere tijdstap. De resultaten van de analyse zullen altijd convergeren, oftewel deze methode is onvoorwaardelijke stabiel.
- lineaire acceleratie (γ = 0.5 en β = 0.16666): aangenomen wordt dat de versnelling van de constructie lineair varieert tijdens het tijdsinterval van elke tijdstap. De resultaten van de analyse zullen niet altijd convergeren.
 Convergentie vindt plaats wanneer de tijdtoename groter is dan 0.551 ·(kortste periode van de constructie), oftewel deze methode is voorwaardelijk stabiel.
- gebruikers invoer ($0 \le \gamma \le 1$ en $0 \le \beta \le 1$): de gebruiker kan een waarde aan de parameters toewijzen en moet zelf bewust zijn van de instabiliteit die hiermee mogelijk wordt veroorzaakt.

Aangezien de resultaten van de constante acceleratie methode altijd zullen convergeren, zal deze methode worden toegepast wanneer gebruik gemaakt wordt van de directe integratie. De waarden voor de parameters van de Newmark integratie methode zijn dan gelijk aan $\gamma = 0.5$ en $\beta = 0.25$.

Voor beide oplossingsmethoden, zowel de modal superposition methode als de directe integratie, dient de grootte van de tijdstap en de demping gedefinieerd te worden. In de volgende paragrafen zullen de waarden voor deze grootheden worden toegelicht.

7.8. Demping

In het eindige elementen programma Midas CIVIL zijn verschillende methoden toe te passen voor het modelleren van de demping van de constructie:

- Modal
- Mass and Stiffness proportional
- Strain energy proportional
- Element mass en stiffness proportional

leder materiaal heeft zijn eigen eigenschappen met betrekking tot demping. Wanneer een constructie uit meerdere materialen bestaat, kan het gewenst zijn om in het eindige elementen model aan ieder constructiedeel dat uit een ander materiaal bestaat, de bijbehorende demping eigenschappen toe te wijzen. De laatste twee methoden, 'strain energy proportional' en 'element mass en stiffness proportional', zijn geschikt voor dit doeleinde. Aangezien bij het modelleren van de brug alleen de betonconstructie wordt gemodelleerd, met beton als het enige materiaal, zal een dergelijke demping methode niet worden toegepast. Materialen waar het asfalt, ballastbeton en overige brugvoorzieningen van zijn vervaardigd, zijn als gelijkmatig verdeelde belasting in het model opgenomen respectievelijk verwaarloosd. Aan de elementen die de opleggingen representeren en uit andere materialen dan beton bestaan, zal geen demping worden toegewezen.

Voor het modelleren van de demping van de betonconstructie resteren twee methoden, namelijk 'modal' en 'mass and stiffness proportional'. In de eerst genoemde demping methode is het mogelijk om een 'damping ratio' te definiëren voor iedere mode en om eventueel aan een beperkt aantal modes een afwijkende specifieke waarde toe te wijzen. Bij de als tweede genoemde methode wordt de demping bepaald uit de op ervaring gebaseerde verhouding tussen demping en massa respectievelijk de verhouding tussen demping en stijfheid. Het uitgangspunt hierbij is dat de dempingsmatrix gerelateerd is aan de massamatrix en stijfheidsmatrix, die in tegenstelling tot de dempingsmatrix wel eenvoudig geformuleerd kunnen worden.

Het toewijzen van een demping aan specifieke modes vereist een zekere ervaring, om die reden is gekozen om geen gebruik te maken van 'modal' demping. Tevens is dit een discrete manier van dempen, waardoor het niet meer mogelijk is om directe integratie toe te passen. Om deze redenen zal 'mass and stiffness proportional' demping worden toegepast. De parameters die bij deze manier van dempen aan de orde komen, zullen hier nog kort worden besproken.

De stijfheid proportionele demping kan worden gezien als een energie verbruikend model door vervorming van de constructie. De massa proportionele demping kan worden beschouwd als een energie verbruikend model door luchtwrijving. In de meeste constructies zal een demping door luchtwrijving niet significant groot zijn en tevens is het erg moeilijk om de massa proportionele demping fysisch te kwantificeren. Zowel de massa proportionele demping als de stijfheid proportionele demping, is alleen maar representatief voor een beperkt aantal eigen modes. Dit nadeel van beide afzonderlijke methode van dempen kan worden weggenomen door ze te combineren, wat Rayleigh deed voor het formuleren van de dempingmatrix. De 'mass and stiffness proportional' demping is daarom ook wel bekend als de Rayleigh demping.

'Mass and stiffness proportional' demping, oftewel de relatie tussen de dempingsmatrix en de massa- en stijfheidsmatrix kan in formulevorm geschreven worden als:

 $[C] = \alpha [M] + \beta [K]$

De waarden voor de parameters α en β worden door Midas berekend met formules, die ook te vinden zijn in verschillende literatuur [6]:

$$\alpha = 2\zeta_1 \omega_1 - \beta \omega_1^2 \qquad \text{en} \qquad \beta = \frac{2\zeta_1 \omega_1 - 2\zeta_m \omega_m}{\omega_1^2 - \omega_m^2}$$

De waarden van α en β worden bepaald op basis van de frequenties ω_1 en ω_m van twee modes met hun bijbehorende 'damping ratio' ζ_1 en ζ_m . De twee modes, mode 1 en mode m, zijn de eerste mode en de laatste mode waarvan wordt geacht dat deze bepalend zijn in de bijdrage aan de dynamische response. Deze laatste mode (mode m) volgt uit de massaparticipatie van iedere mode die bepaald worden in een eigenwaarden analyse.

7.9. Tijdstap

De grootte van de tijdstap in een dynamische analyse heeft in meerdere opzichten invloed op de resultaten die met deze analyse worden verkregen. Ten eerste kan de grootte van de tijdstap bepalend zijn voor de stabiliteit van het integratie proces (afhankelijk van de integratie methode). Voor een integratie methode geldt wanneer deze voorwaardelijk stabiel is, dat er een eis is gesteld aan de grootte van de tijdstap om tot een stabiel integratie proces te komen. Ten tweede is de grootte van de tijdstap bepalend voor de nauwkeurigheid van de uitkomsten van een dynamische analyse. Door achtereenvolgens een steeds kleinere tijdstap toe te passen, kan de kritische tijdstap worden vastgesteld waarbij geen significante verschillen meer optreden in de verkregen resultaten.

8. EINDIGE ELEMENTEN MODEL DINTELHAVENBRUG (2)

8.1. Testmodel

In het vorige hoofdstuk is beschreven uit welke elementen het model opgebouwd is, hoe belastingen op dit model aangebracht worden en welke dynamische analyses uitgevoerd worden voor het verkrijgen van de gewenste resultaten. In dit hoofdstuk zal worden toegelicht hoe een eerste testmodel is opgebouwd, waarmee vervolgens een proces is doorlopen om tot een uiteindelijk betrouwbaar en bruikbaar model te komen.

Het testmodel van de Dintelhavenbrug is opgebouwd uit 6 knopige en 8 knopige volume elementen. Met deze elementen is de geometrie van de brug, zoals beschreven in hoofdstuk 2, exact gemodelleerd (figuur 30).



Figuur 30: Testmodel, 3D aanzicht hele brug

De geometrie van de brug is bekend voor iedere mootovergang. Om die reden hebben sommige volume elementen een lengte-breedte verhouding gekregen van ongeveer 1:12 (figuur 31). Voor spanningsberekeningen is een lengte-breedte verhouding van ongeveer 1:1 optimaal en een verhouding van op zijn hoogst 1:4 vereist. Daarentegen wordt voor het overdragen van stijfheid en het berekenen van verplaatsingen een verhouding aanbevolen van 1:10.



Figuur 31: Testmodel, 3D randveld - steunpunt 2 - middenveld

De enigszins ongewenste afmetingverhoudingen zijn ook te zien in een doorsnede van het model (figuur 32). Smalle elementen naast bredere elementen in de bovenflens zijn de oorzaak van het modelleren van knopen, op de posities waar de wiellasten van de wielen van de vrachtwagens aan moet grijpen.



Figuur 32: Testmodel, doorsnede

Het modelleren van de opleggingen met plaatelementen en een staafelement is in dit stadium nog achterwegen gelaten. Een oplegging wordt in dit beginstadium gerepresenteerd door een knoop, waaraan de corresponderende vrijheidsgraden zijn toegewezen (figuur 33). Een beperking in vrijheid wordt visueel gerepresenteerd met een groen driehoekje en een vrijheid met een zwart driehoekje voor de betreffende vrijheidsgraad. Zo is in onderstaande figuur te zien dat oplegging w2b geen translatie maar wel rotatie om de x, y en z as toestaat. Oplegging w2a heeft alleen een beperking in translatie in x en z richting.



Figuur 33: Testmodel, met randvoorwaarden van oplegging w2a (links) en w2b (rechts)

Met dit eerste testmodel is een proces doorlopen om tot een uiteindelijk betrouwbaar en bruikbaar model te komen. Dit proces bestaat uit de volgende stappen:

- verificatie van het testmodel
- mesh verfijning
- oplegging als stijve plaatelementen in combinatie met een staafelement
- Modal Analysis (eigenwaarden analyse vs. Ritz analyse)
- Transient Response Analysis (modal superposition vs. directe integratie)
- demping parameters
- tijdstap

8.2. Verificatie testmodel

Het model is geverifieerd door gebruik te maken van een ontwerpberekening van de Dintelhavenbrug, die uitgevoerd is met behulp van het Algemeen Ligger Programma (ALP). De gegevens van het model en de resultaten van de berekening zijn te vinden in bijlage C1.

In de ontwerpberekening is gerekend met een puntlast van 720kN, die in het midden van de hoofdoverspanning is geplaatst. Deze belasting is op het testmodel aangebracht als vier puntlasten van 180kN, die symmetrisch geplaatst zijn op de bovenrand van de middendoorsnede van de hoofdoverspanning (figuur 34).



Figuur 34: Testmodel, belast door 720kN verdeeld over vier puntlasten

In zowel de ontwerpberekening als in het testmodel is gerekend met een elasticiteitsmodulus van $3.93 \cdot 10^7 \text{kN/m}^2$ en soortelijke gewicht van 25.5kN/m^3 . Beide modellen zijn met elkaar vergeleken met betrekking tot reactiekrachten, verplaatsing, hoekverdraaiing en eigen gewicht. Tevens is het horizontale en verticale evenwicht gecontroleerd. De resultaten die met het in Midas CIVIL gebouwde testmodel zijn verkregen, zijn opgenomen in bijlage C2.

Om een goede vergelijking te kunnen maken, zijn de resultaten van het ALP model en het Midas CIVIL 3D model opgesomd in onderstaande tabel.

	ALP model	Midas CIVIL testmodel
Reactiekracht steunpunt 1 (kN)	242.1	-241.8294
Reactiekracht steunpunt 2 (kN)	-604.0	603.6328
Reactiekracht steunpunt 3 (kN)	-596.4	596.1700
Reactiekracht steunpunt 4 (kN)	238.2	-237.9734
Verplaatsing in het midden van de	26.03	26.80988
hoofdoverspanning (mm)		
Rotatie ter hoogte van steunpunt 1 (rad)	-0.000220	-0.00021381
Eigen gewicht van de constructie (kN)	122381.485	128512.69

Tabel 18: Resultaten verkregen met ALP model en Midas CIVIL 3D model

De reactiekrachten die met ALP gevonden zijn verschillen van teken ten opzichte van de waarden die met Midas CIVIL worden gevonden, vanwege het feit dat de richting van de positieve z-as tegengesteld aan elkaar gedefinieerd is.

De vergelijking van het Midas CIVIL testmodel met het ALP model geeft aan dat de oplegreacties in z richting, de rotatie bij de opleggingen en het eigen gewicht van de constructie gewenste resultaten geven. Het verfijnen van de mesh in langsrichting van de brug (x richting) is dan ook niet direct noodzakelijk. Daarentegen kan geen zinnig oordeel worden gegeven over de betrouwbaarheid van de oplegreacties in x en y richting van het testmodel, aangezien hiervoor geen vergelijkbare resultaten uit het ALP model beschikbaar zijn. In de volgende paragraaf zal onderzocht worden hoe fijn de mesh in de corresponderende y en z richting moet zijn, voor het verkrijgen van gewenste resultaten.

8.3. Mesh verfijning

Om een oordeel te kunnen geven over de fijnheid van de mesh in y en z richting, worden de verplaatsingen en oplegreacties geanalyseerd in de betreffende richtingen. Hierbij zal gekeken worden naar verplaatsingen en oplegreacties als gevolg van een eenheidsaslast van 1kN die 'over de brug voortbeweegt' (figuur 35).





leder wiel van de as geeft een belasting van 0.5kN. Deze wielkrachten worden telkens op een volgende knoop geplaatst, die gelegen is op de theoretische lijn (rode lijnen figuur 35) waarover de vrachtwagen over de brug rijdt. Per positie kunnen de resultaten ter hoogte van de opleggingen worden opgevraagd, waaruit het verloop van de invloedslijnen voor oplegreacties, verplaatsingen en rotaties volgen. Met behulp van deze invloedslijnen is de mesh gevonden in zowel y als z richting, waarbij geen significante verschillen in de resultaten meer optreden bij het verkleinen van de elementen. Als voorbeeld zijn in bijlage D de invloedslijnen van de verplaatsing Ux van oplegging w1a en Uy van oplegging w2a gegeven voor mesh verfijningen in y en z richting. Met het onderzoeken van de statische invloedslijnen is nu vastgesteld welke fijnheid van de mesh gewenst is (figuur 36, 37 en 38).



Figuur 36: Eindige elementen model Dintelhavenbrug, 3D gehele brug



Figuur 37: Eindige elementen model Dintelhavenbrug, zijaanzicht steunpunt 2



Figuur 38: Eindige elementen model Dintelhavenbrug, 3D steunpunt 1

De afmetingen van de elementen die de betonconstructie van de brug representeren zijn hiermee bepaald. Wat betreft de geometrie van het eindige elementen model, dient tot slot de wijze van modelleren van de opleggingen te worden beschouwd.

8.4. Oplegging als stijve plaatelementen in combinatie met een staafelement

Tot nog toe zijn de opleggingen in het testmodel gemodelleerd als een knoop, waaraan de randvoorwaarden van de betreffende opleggingen zijn toegewezen. Echter, in de praktijk zal de bovenzijde van de oplegging een stijf vlak zijn ten opzichte van de betonconstructie van de brug. Daarnaast zal het glijvlak van de oplegging zich niet direct onder, maar op een zekere afstand (74mm) van de onderzijde van de betonconstructie bevinden. Om in het model met deze twee praktijksituaties rekening te houden, wordt de oplegging niet langer gemodelleerd als individuele knoop. Er zal gebruik gemaakt worden van plaatelementen en een staafelement met een grote stijfheid, zoals beschreven in het vorige hoofdstuk.

Na onderzoek is gebleken dat de plaatelementen geen significante invloed hebben op de krachten, verplaatsingen en rotaties die bij de opleggingen optreden. Het stijve vlak heeft slechts invloed op de vervorming van de betonconstructie en lokale spanningen rondom de knoop die het hart van de oplegging representeert. Of het staafelement invloed heeft op het gedrag van de brug, zal nu worden onderzocht.

Het toepassen van een staafelement brengt als voordeel met zich mee dat de krachten, verplaatsingen en rotaties van een oplegging direct uit het model kunnen worden verkregen. Hierdoor worden tijdrovende nabewerkingen voorkomen. Nabewerkingen bestaande uit het sommeren van lokale knoopkrachten na een dynamische analyse voor het verkrijgen van een oplegreactie en het bepalen van rotaties door gebruik te maken van de verplaatsingen in de doorsnede ter hoogte van een oplegging. Afgevraagd kan worden of naast dit voordeel het toepassen van staafelementen invloed heeft op de stijfheid van de brug. In tabel 19 zijn de eigenfrequenties gegeven, die bepaald zijn voor een model waarin staafelementen met een hoogte van 74mm en 1mm zijn toegepast en een model waarin geen staafelement zijn toegepast. Voor dit doeleinde zijn de eigenfrequenties bepaald met een eigenwaarden analyse. Hoe langer de ligger is, hoe minder stijf de brug reageert en hoe lager de eigenfrequenties van de brug zijn. Een ligger met een hoogte van slechts 74mm blijkt nauwelijks verschillen te vertonen met het model waarin geen staafelement aanwezig zijn. Ook de doorsnede van het staafelement bleek geen invloed te hebben op de eigenfrequenties van de brug.

Mode	Eigenfrequentie (Hz)					
woue	Liggerhoogte 74mm	Liggerhoogte 1mm	Zonder staafelement			
1	0.497930	0.498079	0.498079			
2	1.086299	1.087079	1.087090			
3	1.132430	1.134809	1.134840			
4	1.634760	1.635403	1.635411			
5	2.119861	2.119970	2.119972			
6	2.785446	2.789260	2.789309			
7	2.819574	2.823721	2.823777			
8	3.097174	3.105540	3.105649			
9	3.248131	3.257273	3.257391			
10	3.268520	3.268522	3.268523			

Tabel 19: Invloed liggerhoogte op eigenfrequenties van de brug

Om te voorkomen dat nabewerkingen gedaan moeten worden en om een zo realistisch mogelijk model te genereren, zal een oplegging worden gemodelleerd met stijve plaaten staafelementen. De plaatelementen van één oplegging hebben een dikte van 3mm. Het staafelement is 74mm lang en heeft een doorsnede van 5mm bij 5mm.

Met de laatst genoemde modellering van de opleggingen en de hiervoor beschreven mesh verfijning staat de geometrie van het model en de grootte van de elementen vast. Vanuit het testmodel is hiermee het definitieve eindige elementen model van de brug verkregen.

8.5. Modal Analysis

Nu de geometrie van het model, randvoorwaarden, typen elementen en grootte van de elementen vast ligt, zal de massa en stijfheid van de brug niet meer veranderen. Dit geeft de gelegenheid om de eigenfrequenties, eigenmodes en bijbehorende massaparticipaties van de brug te analyseren. Het uitvoeren van een modal analysis is hiervoor noodzakelijk, waarvoor gebruik gemaakt kan worden van een eigenwaarden analyse of Ritz analyse.

Om te kunnen bepalen van welke methode gebruik gemaakt wordt, zijn voor beide analyse methoden de eigenfrequenties en massaparticipaties bepaald van de eerste 40 modes. De resultaten van deze analyses zijn opgenomen in bijlage E. De eerste modes die volgen uit een eigenwaarden analyse en uit een Ritz analyse zijn aan elkaar gelijk. Vanaf mode 16 zijn de eigenfrequenties die volgen uit beide methoden significant verschillend. De Ritz analyse laat dan immers modes achterwegen die niet relevant zijn in de bijdrage aan de dynamische response. Dit is tevens terug te zien in het feit dat met een Ritz analyse al met een beperkt aantal modes een hoog percentage massaparticipatie wordt verkregen voor alle translatievrijheidsgraden.

De belasting die gebruikt is om de startvectoren van de Ritz analyse te bepalen en het aantal startvectoren die met de betreffende belasting zijn uitgerekend zijn:

Eigen gewicht	10 vectoren
Ground acceleration X direction	10 vectoren
Ground acceleration Y direction	10 vectoren
Ground acceleration Z direction	10 vectoren

Afhankelijk van de aanwezigheid van general link elementen, kunnen extra startvectoren worden bepaald voor iedere general link.

8.6. Transient Response Analysis

Voor het uitvoeren van een transient response analysis geeft Midas CIVIL de mogelijkheid om gebruik te maken van 'modal superposition' of 'directe integratie'. De modal superposition methode vereist dat eigenmodes bepaald worden, op basis waarvan vervolgens de dynamische response van de constructie kan worden bepaald. Zoals in het vorige hoofdstuk al is opgemerkt, wordt met de modal superposition methode een benadering van de exacte oplossing gevonden. Om tot een nauwkeurige benadering van de exacte oplossing te komen, dient van een hoeveelheid modes gebruik gemaakt te worden die samen minimaal 95% massaparticipatie leveren voor een betreffende vrijheidsgraad. In de eerste tabel van bijlage E3 is te zien dat met de eerste 40 modes die volgen uit een eigenwaarden analyse een massaparticipatie wordt bereikt van slechts 83.33% voor translatie in y richting. Met de eerste 40 modes die volgen uit een Ritz analyse wordt daarentegen een massaparticipatie bereikt van 98.43% voor translatie in y richting. Ook voor de overige translatievrijheidsgraden wordt een aanzienlijk hoog massaparticipatiepercentage bereikt. Voor het uitvoeren van een transient response analysis zal daarom gebruik worden gemaakt van de model superposition methode i.c.m. een Ritz analyse. Eventueel kan ondanks de lange rekentijd eenmalig directe integratie worden uitgevoerd, om zo de benaderde oplossing die volgt uit de modal superpostion methode te kunnen vergelijken met de exacte oplossing die volgt met directe integratie.

8.7. Demping

Uit het analyseren van de massaparticipatie van de eigenmodes, is vastgesteld dat de eerste 38 modes bepalend zullen zijn voor de dynamische response van de brug. Met deze modes wordt een gezamenlijke massaparticipatie bereikt van ruim 98% voor translatie in zowel langs- als dwarsrichting (x en y richting). Op basis van de eigenfrequentie van mode 1 en 38 en de daarbij aangenomen 'damping ratio's', zijn de waarden van α en β voor Rayleigh demping te bepalen. De waarden van de 'damping ratio's' zijn gesteld op 2% en 5%. Dit zijn waarden die gebaseerd zijn op ervaring die tot nog toe opgedaan is op het gebied van 'damping ratio's' voor bruggen [8,9].

$$\beta = \frac{2\zeta_1\omega_1 - 2\zeta_m\omega_m}{\omega_1^2 - \omega_m^2} = \frac{2\zeta_1\omega_1 - 2\zeta_{38}\omega_{38}}{\omega_1^2 - \omega_{38}^2} = \frac{2 \cdot 0.02 \cdot 3.128588 - 2 \cdot 0.05 \cdot 216.340191}{3.128588^2 - 216.340191^2} = 0.00045965726$$

$$\alpha = 2\zeta_1\omega_1 - \beta\omega_1^{2} = 2 \cdot 0.02 \cdot 3.128588 - 0.00045965726 \cdot 3.128588^{2} = 0.1206443658$$

Vervolgens kan met de onderstaande formule voor iedere eigenfrequentie ω_i een bijbehorende 'damping ratio' ζ_i worden bepaald.

$$\zeta_{i} = \frac{\alpha}{2\omega_{i}} + \frac{\beta\omega_{i}}{2} = \frac{0.1206443658}{2\cdot\omega_{i}} + \frac{0.00045965726\cdot\omega_{i}}{2}$$

In figuur 39 is de grafiek van deze functie gegeven.



Figuur 39: Rayleigh demping grafiek

De waarde voor de coëfficiënten α en β die hiervoor zijn berekend, zijn gelijk aan de waarden die Midas berekent op basis van twee frequenties en bijbehorende 'damping ratio''s (figuur 40).

Damping							
Damping Method : Mass 8	k Stiffness Proportional	•					
Mass and Stiffness Coefficients		CV55					
Damping Type :	Proportional	Proportional					
C Direct Specification :	0	0					
Calculate from Modal Dampi	ng : 0.12064430661	0.00045965726					
Coefficients Calculation	Coefficients Calculation						
	Mode 1	Mode 2					
Frequency [Hz] :	0.49793	34.431611					
O Period [sec] :	0	0					
Damping Ratio :	0.02	0.05					
Show Damping Ratio							

Figuur 40: Rayleigh demping invoer Midas CIVIL

Op basis van deze invoer is Midas CIVIL instaat voor elke eigenfrequentie de bijbehorende 'damping ratio' te bepalen (figuur 41).

Mass Coefficient	0.12064430519
Frequency [Hz] Period [sec]	20 1
Damping Ratio	0.02936115498

Figuur 41: 'Damping ratio' bepaald door MDAS CIVIL

8.8. Tijdstap

Een dynamische analyse wordt uitgevoerd voor een zekere tijdsduur, die opgedeeld is in tijdstappen. De stabiliteit van de integratiemethode en de belasting op de constructie, kunnen bepalen zijn voor de grootte van de tijdstap.

In dit geval blijkt de integratiemethode, de Newmark methode, echter niet bepalend te zijn voor de grootte van de tijdstap. De waarden van de parameters van dit integratieschema zijn $\gamma = 0.5$ en $\beta = 0.25$, waardoor deze methode onvoorwaardelijk stabiel is. De grootte van de tijdstap is dus niet bepalen voor de stabiliteit van het integratieschema.

De belasting is wel bepalend voor de tijdstap grootte. Een vrachtwagen wordt als dynamische belasting gesimuleerd met behulp van tijdsfuncties, dynamische knopen en aankomsttijden (zie paragraaf 7.5). Wanneer een element kort is, of de snelheid van de vrachtwagen hoog, zal de helling van de tijdsfunctie steiler zijn. Als voorbeeld wordt nogmaals gebruik gemaakt van de tijdsfunctie in figuur 29 uit het vorige hoofdstuk. Deze tijdsfunctie is gerelateerd aan een dynamische knoop van snede 10, een vrachtwagensnelheid van 80km/h en twee naast gelegen elementen van 5m lang (zie toelichting paragraaf 7.5).

Een vrachtwagen die 80km/h rijdt (22.222m/s), heeft 0.225s nodig om over een afstand van 5m de belasting van 0 tot aan de maximale waarden van 0.5kN op te bouwen. Er zal dus gebruik gemaakt moeten worden van een tijdstap, zodanig dat de belasting in een aantal stappen opgebouwd kan worden. In dit geval vereist het opbouwen van de belasting in vijf stappen al een tijdstap grootte van 0.045s.

De kortste elementen die in het model voorkomen zullen maatgevend zijn voor de grootte van de tijdstap. Ter hoogte van de mesh verfijning nabij de steunpunten komen elementen voor met een grootte die een extreem kleine tijdstap vereisen. Een dergelijke kleine tijdstap zal er voor zorgen dat de dynamische analyse een tijdrovend proces zal worden. Om dit te voorkomen zijn meerdere naast elkaar gelegen korte elementen 'samen genomen', waaraan slechts één tijdsfunctie is toegewezen.

Een andere situatie waarbij de helling van de tijdsfunctie steil is, treedt op wanneer de vrachtwagen op de brug arriveert. De brug heeft een zeer beperkte tijd om te reageren op de belasting van een vrachtwagen, wanneer deze de brug op rijdt. Met andere woorden, de afstand en dus de tijd waarover de belasting kan aangroeien is beperkt. Deze zogenaamde insteltijd bedraagt slechts 0.037s, bij een vrachtwagensnelheid van 80km/h, voegovergang van 0.5m en wielprint van 320mm.

insteltijd: $t = \frac{0.5 + 0.320}{22.2222} = 0.037s$

Om deze belasting ook nog eens in bijvoorbeeld vijf stappen aan te brengen, is een tijdstap nodig van t = 0.037/5 = 0.0074s of kleiner. Echter, uit verschillende korte dynamische analyses is gebleken dat het aanbrengen van de volledige belasting op tijdstip t = 0 en het stapsgewijs laten aangroeien van de belasting vanaf tijdstip t = 0 geen significante verschillen vertonen.

Uiteindelijk kan worden geconcludeerd dat de tijdsfuncties in relatie tot de (gezamenlijke) elementlengte, bepalend zijn in de keuze voor de grootte van de tijdstap. De dynamische analyses zijn uitgevoerd met een tijdstap grootte van 0.01s. Ter controle is een dynamische analyse uitgevoerd, waarbij gebruik is gemaakt van een kleinere tijdstap (0.005s). De resultaten vertoonde geen significante verschillen in vergelijking tot de resultaten die volgden uit de dynamische analyses met een tijdstap grootte van 0.01s.

8.9. Geverifieerd eindige elementen model

In de voorgaande paragraven van dit hoofdstuk is toegelicht hoe het eerste testmodel is opgebouwd en welke ontwikkelingen dit model heeft ondergaan, om tot het uiteindelijke betrouwbare en bruikbare model te komen. Voor de volledigheid worden de keuzes die gemaakt zijn en de ontwikkelingen die het testmodel heeft ondergaan, in deze paragraaf kort samengevat.

Betonconstructie

De betonconstructie is opgebouwd uit volume elementen, met 6 of 8 knopen. Ter hoogte van de steunpunten is mesh verfijning toegepast, voor het verkrijgen van nauwkeurige resultaten.

Opleggingen

Een oplegging is opgebouwd uit vier plaatelementen. Aan de knoop waar de vier plaatelementen samen komen is een staafelement bevestigd. Het staafelement dient er voor om eenvoudig resultaten van een dynamische analyse op te kunnen vragen in een oplegging. De randvoorwaarden van een oplegging zijn toegewezen aan de onderste knoop van het staafelement.

<u>Belastingen</u>

Op de brug zullen verkeersbelastingen en thermische belastingen afzonderlijk van elkaar worden aangebracht. De verkeersbelasting zal zowel statische als dynamische worden beschouwd.

Analyse methode

De dynamische analyse zal uitgevoerd worden met de modal superposition methode in combinatie met de Ritz analyse. De directe integratie methode kan ter controle eenmalig worden toegepast.

Demping

De brug zal gedempt worden door middel van Rayleigh demping. De 'damping ratio' zal dus voor iedere eigenfrequentie verschillend zijn.

<u>Tijdstap</u>

De tijdstap van de dynamische analyse is gelijk aan t = 0.01s.

9. GEDRAG VAN OPLEGGINGEN ALS GEVOLG VAN STATISCHE VERKEERSBELASTING

9.1. Eenheidsaslast

In het vorige hoofdstuk is al gebruik gemaakt van een eenheidsaslast, om te onderzoeken wat de invloed van mesh verfijning is op de resultaten bij de opleggingen. Van deze eenheidsaslast zal nu weer gebruik gemaakt worden, nu om inzicht te krijgen in de verplaatsingen, rotaties en krachten die de opleggingen te verwerken krijgen.





Om een eenheidsaslast te simuleren die over de brug "rijdt", worden de puntlasten die een as representeren op verschillende posities over de lengte van de brug geplaatst (figuur 42). In dwarsrichting van de brug komt de plaats van de puntlasten overeen met de positie waar een vrachtwagen zich op de rechter rijstrook van de hoofdrijbaan zou bevinden. Per positie kunnen de benodigde resultaten ter hoogte van de opleggingen worden opgevraagd, waarmee het verloop van de invloedslijnen wordt bepaald. De invloedslijnen voor verplaatsingen, rotaties en oplegreacties zijn opgenomen in bijlage F.

9.2. Verkeersbelasting

Vanuit de grafieken voor de vrijheidsgraden als gevolg van een eenheidsaslast, is het mogelijk om na een verschuiving over de asafastand, vermenigvuldiging met de aslast en een sommatie van de individuele assen de resultaten voor verplaatsingen, rotaties en oplegreacties te verkrijgen voor de verschillende vrachtwagentypen. Ter verduidelijking is met behulp van een virtuele vrachtwagen dit principe toegelicht in bijlage G. Op vergelijkbare wijze zijn de invloedslijnen verkregen voor de reactiekrachten, verplaatsingen en rotaties als gevolg van de vrachtwagentypen uit het model FLM M [75/25].

Deze lijnen zijn gegeven voor vrachtwagens die met een snelheid van 90km/h over de brug rijden. In de praktijk rijden de vrachtwagens ongeveer deze snelheid, ondanks dat de maximaal toegestane snelheid slechts 80km/h bedraagt. Uit de lijnen voor de verplaatsingen in relatie tot de tijd, zijn de lijnen afgeleid voor de snelheid waarmee de verplaatsingen optreden. In bijlage H zijn de grafieken gegeven voor de reactiekrachten, verplaatsingen, rotaties en snelheden van iedere opleggingen, veroorzaakt door de verschillende vrachtwagentypen. Aangezien oplegging w1a verplaatsing toestaat in zowel x als y richting en we hier te maken hebben met de situatie waarbij geen wrijving in de opleggingen aanwezig is, zullen de oplegreactie in langs- en dwarsrichting nul zijn. Alle grafieken waarbij de betreffende parameter nul is, zijn daarom niet in bijlage H opgenomen. Uit de grafieken die wel in deze bijlagen zijn opgenomen zijn de onderstaande conclusies getrokken, vermeld in tabel 20 en 21.

Reactiekrachten

De horizontale reactiekrachten blijven voor deze wrijvingsloze situatie beperkt tot 3kN in dwarsrichting en 20kN in langsrichting. In paragraaf 9.3 zal worden aangetoond dat de horizontale reactiekrachten aanzienlijk groter zijn, wanneer wrijving in de opleggingen in rekening wordt gebracht.

De verticale reactiekrachten variëren voor de opleggingen van de eindsteunpunten over het algemeen van 50kN tot 250kN. De twee zwaarste vrachtwagentypen zorgen voor een uitschieter naar 300kN en 400kN.

De verticale reactiekrachten variëren voor de opleggingen van de middensteunpunten over het algemeen van 120kN tot 340kN. De twee zwaarste vrachtwagentypen zorgen voor een uitschieter naar 400kN en 550kN. Het lichtste vrachtwagentype zorgt voor een reactiekracht die op zijn hoogst gelijk is aan 80kN.

Aangezien het eigen gewicht van de constructie zorgt voor enorme verticale reactiekrachten bij de middensteunpunten, kan worden geconcludeerd dat de verticale reactiekrachten die de vrachtwagens veroorzaken verwaarloosbaar zijn. Dit geldt niet voor de opleggingen van de eindsteunpunten. De waarden van de verticale krachten die het eigen gewicht van de constructie veroorzaakt zijn vermeld in tabel 23.

Verplaatsingen

In langsrichting bedragen de grootste verplaatsingen die de opleggingen van de eindsteunpunten te verwerken krijgen ongeveer 2.5mm. Bij de opleggingen van de middensteunpunten loopt de maximale verplaatsing op tot 4.4mm.

Het zwaarste vrachtwagentype T12O3A2-25% geeft voor oplegging w3a -1.5mm en +4.4mm als extreme verplaatsingen in langsrichting (zie bijlage H2, grafiek 'Oplegging w3a – verplaatsing Ux'). Dat betekent dat de grootste glijweg gelijk is aan: 1.5 + 4.4 = 5.9mm

Verplaatsingen in dwarsrichting zijn zoals verwacht zeer gering, gezien de grote stijfheid van de betonnen koker. De grootste verplaatsing bedraagt slechts zo'n 0.02mm, veroorzaakt door de zwaarste vrachtwagentypen.

Rotaties

Door de grote stijfheid van de betonnen koker zijn ook de rotaties zeer gering. Rotaties om de x en z as zijn beperkt tot een orde grootte van 10^{-6} rad en dus te verwaarlozen.

De grootste rotaties die optreden zijn rotaties om de y as (dwarsrichting van de brug), met een orde grootte van 10^{-4} rad. Voor opleggingen van steunpunt 1 en 4 geldt een maximale rotatie van 0.00034rad en voor opleggingen van steunpunt 2 en 3 een maximale rotatie van 0.00028rad. De trillingstijd bedraagt zo'n 11 seconde, wat gelijk is aan een frequentie van f = 1/11 = 0.091Hz

Tabel 20: Conclusies voor reactiekrachten, verplaatsingen en rotaties veroorzaakt door vrachtwagens (statisch), waarbij wrijving in opleggingen buiten beschouwing is gelaten

Snelheden

De maximale snelheid waarmee verplaatsingen in langsrichting optreden ligt zo rond de 1.5mm/s. Dit is een extreme waarde, de gemiddelde snelheid ligt beduidend lager. De gemiddelde snelheden van verplaatsingen in langsrichting zijn met Excel berekend en bedragen achtereenvolgens 0.214mm/s, 0.370mm/s en 0.203mm/s voor opleggingen van steunpunt 1, 3 en 4 (aantal vrachtwagens is hierbij in rekening gebracht).

In langsrichting treden de verplaatsingen bij de opleggingen van de eindsteunpunten op met een snelheid van ongeveer 1mm/s. Bij de opleggingen van de middensteunpunten geldt een aanzienlijk lagere snelheid van ongeveer 0.03mm/s tot op zijn hoogst 0.04mm/s.

De snelheden van de grafieken in bijlage H4 zijn bepaald op basis van de verplaatsingen die zijn gevonden voor de verschillende vrachtwagentypen die met een snelheid van 90km/h over de brug rijden. Wrijving in de opleggingen is hierbij niet in rekening gebracht. Echter, wanneer wel wrijving in rekening gebracht wordt, zal de verplaatsing in eerste instantie tegen kunnen worden gegaan. Bij het overwinnen van de wrijving treedt de verplaatsing uiteindelijk toch op, alleen met een andere (naar verwachting hogere) snelheid.

Tabel 21: Conclusies voor snelheden van verplaatsingen, veroorzaakt door vrachtwagens (statisch), waarbij wrijving in opleggingen buiten beschouwing is gelaten

Een andere belangrijke uitkomst die volgt uit de statische simulatie van vrachtwagens, die tot nog toe niet besproken is, is de slijtweg die bij de opleggingen optreedt. Allereerst zal gekeken worden naar de slijtwegen in horizontale glijvlakken. De waarde van de totale slijtweg die een vrachtwagen veroorzaakt in een wrijvingsloze situatie, is voor ieder vrachtwagentype opgesomd in de onderstaande tabellen. Gezien de hoeveelheid data zijn de slijtwegen voor de lichte en zware vrachtwagentypen in een afzonderlijke tabel gegeven.

		Slijtweg voor lichte vrachtwagentypen (mm)						
Oplegging	Richting	V11-75%	V12-75%	T1102-75%	T1103-75%	V12A12-75%	T1203A2-75%	
w1a	x	1.073889	1.999887	1.981784	2.900518	4.290484	5.218616	
	У	0.018749	0.034701	0.034281	0.049785	0.073231	0.088844	
w1b	х	1.074059	2.000154	1.982147	2.900999	4.291169	5.219571	
	У	0	0	0	0	0	0	
w2a	x	0	0	0	0	0	0	
	У	0.011382	0.021672	0.018616	0.027958	0.040295	0.048460	
w2b	х	0	0	0	0	0	0	
	У	0	0	0	0	0	0	
w3a	x	1.853760	3.454240	3.423228	5.013454	7.420770	9.039632	
	У	0.011384	0.021718	0.019134	0.027515	0.041130	0.047637	
w3b	x	1.852071	3.451099	3.420176	5.008987	7.414194	9.031692	
	У	0	0	0	0	0	0	
w4a	x	1.018193	1.897104	1.873903	2.746192	4.060479	4.936623	
	У	0.016270	0.030814	0.030408	0.045739	0.067639	0.083471	
w4b	х	1.019342	1.899050	1.876122	2.749212	4.065118	4.942629	
	У	0	0	0	0	0	0	

Tabel 22: Slijtweg voor individuele vrachtwagens (lichte typen 75%)

Uit zowel tabel 22 als 23 is op te maken dat de slijtweg van een oplegging in dwarsrichting van de brug (y richting), veroorzaakt door een individuele vrachtwagen, erg klein is. Zelfs nu wrijving nog buiten beschouwing is gelaten, zijn de grootst optredende slijtwegen veroorzaakt door het zwaarste vrachtwagentype T12O3A2-25% slechts 0.145137mm en 0.137484mm (tabel 23) voor respectievelijk oplegging w1a en w4a.

De slijtwegen in langsrichting (x richting) van de opleggingen zijn aanzienlijk groter. De verschillende individuele vrachtwagentypen leveren enkele millimeters aan slijtweg, per keer dat ze de brug passeren.

		Slijtweg voor zware vrachtwagentypen (mm)					
Oplegging	Richting	V11-25%	V12-25%	T1102-25%	T1103-25%	V12A12-25%	T1203A2-25%
w1a	х	1.903481	3.461963	3.046538	5.126244	6.363467	8.527861
	У	0.033219	0.060008	0.052511	0.087689	0.108403	0.145137
w1b	х	1.903777	3.462392	3.047122	5.127069	6.364431	8.529337
	У	0	0	0	0	0	0
w2a	х	0	0	0	0	0	0
	У	0.020226	0.037757	0.028878	0.050518	0.060011	0.079953
w2b	x	0	0	0	0	0	0
	У	0	0	0	0	0	0
w3a	х	3.286866	5.983674	5.265106	8.86574	11.01076	14.77349
	У	0.020282	0.037854	0.028956	0.049768	0.060872	0.078447
w3b	x	3.283869	5.978236	5.260435	8.857845	11.00097	14.76058
	У	0	0	0	0	0	0
w4a	x	1.805467	3.286613	2.883272	4.857682	6.025134	8.070342
	У	0.029199	0.054682	0.047957	0.082363	0.101289	0.137484
w4b	х	1.80751	3.290278	2.886427	4.863132	6.032313	8.079944
	У	0	0	0	0	0	0

Tabel 23: Slijtweg voor individuele vrachtwagens (zware typen 25%)

Het model FLM M [75/25] is gebaseerd op 3 miljoen vrachtwagens per jaar, verdeeld over de 12 vrachtwagentypen. Wanneer al deze vrachtwagens de brug één voor één passeren zonder daarbij gelijktijdig op de brug aanwezig te zijn, wordt de bovengrens van de jaarlijkse slijtweg gevonden. De waarden voor de slijtwegen van iedere oplegging zijn vermeld in tabel 24, voor zowel langsrichting als dwarsrichting.
Oplegging	Bovengrens van de slijtweg per jaar in langsrichting (m)	Bovengrens van de slijtweg per jaar in dwarsrichting (m)
w1a	9826.107413	168.565875
w1b	9827.737613	0
w2a	0	95.398125
w2b	0	0
w3a	16991.7117	94.652475
w3b	16976.58911	0
w4a	9304.517175	155.3853375
w4b	9315.04935	0

Tabel 24: Bovengrens van de slijtweg per jaar

De waarde van de slijtwegen in een jaar worden volgen dus uit de sommatie van de slijtweg die iedere individuele vrachtwagen veroorzaakt:

 $\mathbf{S}_{\text{oplegging}} = \sum \mathbf{S} \mathbf{x}_{\text{oplegging; vrachtwagentype}} \cdot \mathbf{n}_{\text{vrachtwagentype}}$

Ter verduidelijking, de waarde van de slijtweg in langsrichting (in 1 jaar) van oplegging w1a is als volgt bepaald, waarbij het aantal vrachtwagens dat van ieder type in 1 jaar voorkomt volgt uit het model FLM M [75/25] (tabel 13):

$$\begin{split} &\mathsf{Sx}_{\mathsf{w1a}} = \sum \mathsf{Sx}_{\mathsf{w1a};\mathsf{vrachtwagentype}} \cdot \mathsf{n}_{\mathsf{vrachtwagentype}} \\ &= 1.073889 \cdot 225000 + 1.999887 \cdot 225000 + 1.981784 \cdot 337500 + 2.900518 \cdot 1125000 + 4.290484 \cdot 1125000 \\ &+ 5.218616 \cdot 225000 + 1.903481 \cdot 75000 + 3.461963 \cdot 75000 + 3.046538 \cdot 112500 + 5.126244 \cdot 375000 \\ &+ 6.363467 \cdot 37500 + 8.527861 \cdot 75000 = 9826107.413 \text{mm} = 9826.107413 \text{m} \end{split}$$

Op vergelijkbare wijze kan de slijtweg worden geanalyseerd die optreedt in gekromde glijvlakken, de glijvlakken in bolsegment opleggingen. De verplaatsing u (figuur 43) in het gekromde vlak volgt uit de vermenigvuldiging van de straal R met de rotatie Φ . De bolsegmenten in de opleggingen van de Dintelhavenbrug hebben een straal van 870mm en 840mm voor respectievelijk oplegging w4a en w4b. De straal wordt in de praktijk beperkt tot een waarde van 40inch [17], wat ongeveer gelijk is aan 1m.



Figuur 43: Verplaatsing in gekromd vlak van een bolsegment oplegging

Het verloop van de rotaties, die worden veroorzaakt door de verschillende afzonderlijke vrachtwagentypen, is te zien in de grafieken van bijlage H3. Per overspanning is de extreme rotatie die optreedt af te lezen, van waaruit na vermenigvuldiging met de straal van het bolsegment een verplaatsing in het gekromde vlak kan worden vastgesteld (tabel 25). Dit zijn verplaatsingen als gevolg van rotatie Φ_y om de as in dwarsrichting (y-as).

Vrachtwagontwoon	Slijtweg in het g	gekromde vlak als ge	evolg van rotaties or	m de y-as (mm)
vracniwageniypen	w1a	w1b	w4a	w4b
v11-75%	0.1682	0.1685	0.1723	0.1726
v11-25%	0.2982	0.2987	0.3054	0.3059
v12-75%	0.3137	0.3142	0.3214	0.3218
v12-25%	0.5434	0.5442	0.5569	0.5575
T1102-75%	0.3106	0.3110	0.3182	0.3186
T1102-25%	0.4772	0.4779	0.4893	0.4900
T11O3-75%	0.4546	0.4552	0.4662	0.4669
T11O3-25%	0.8035	0.8048	0.8245	0.8256
V12A12-75%	0.6724	0.6733	0.6891	0.6899
V12A12-25%	0.9975	0.9993	1.0229	1.0242
T12O3A2-75%	0.8195	0.8209	0.8402	0.8414
T12O3A2-25%	1.3396	1.3418	1.3734	1.3754

 Tabel 25: Slijtweg in het gekromde vlak van de bolsegment opleggingen

Ter verduidelijking, de waarde van de slijtweg van oplegging w1a, veroorzaakt door vrachtwagen T12O3A2-25%, is als volgt bepaald:

$$\begin{split} S_{w1a;T1203A2-25\%} &= 2 \cdot \varphi_{max;zijoverspanning} \cdot R + 2 \cdot \varphi_{min;middenoverspanning} \cdot R + 2 \cdot \varphi_{max;zijoverspanning} \cdot R \\ &= 2 \cdot 4.39894 \cdot 10^{-5} \cdot 1000 + 2 \cdot \left| -2.94521 \cdot 10^{-4} \right| \cdot 1000 + 2 \cdot 3.31306 \cdot 10^{-4} \cdot 1000 = 1.3396 \text{mm} \end{split}$$

De waarden van de extreme rotaties zijn in de grafiek 'Oplegging w1a - rotatie Φ_y ' af te lezen (bijlage H3), waarbij de oranje lijn correspondeert met vrachtwagentype T12O3A2-25%. De overige waarden voor de slijtwegen als gevolg van de afzonderlijke vrachtwagentypen zijn op dezelfde wijze bepaald. Door de bijdrage van iedere vrachtwagen te vermenigvuldigen met het aantal keer dat de betreffende vrachtwagen in een jaar voorkomt, kan de bovengrens van de jaarlijkse slijtwegen in de gekromde vlakken worden vastgesteld (tabel 26).

Zo volgt voor oplegging w1a een bovengrens van de jaarlijkse optredende slijtweg die gelijk is aan:

$$\begin{split} Sx_{w1a} &= \sum Sx_{w1a;vrachtwagentype} \cdot n_{vrachtwagentype} \\ &= 0.168152 \cdot 225000 + 0.298188 \cdot 75000 + 0.313683 \cdot 225000 + 0.543386 \cdot 75000 + 0.310564 \cdot 3375000 \\ &+ 0.477232 \cdot 112500 + 0.454578 \cdot 1125000 + 0.803543 \cdot 375000 + 0.672362 \cdot 112500 + 0.997528 \cdot 375000 \\ &+ 0.819532 \cdot 225000 + 1.339633 \cdot 75000 = 1540678 \\ mm &= 1540.68 \\ mm &= 154$$

Vrachtwagentypen	Aantal keer dat een vrachtwagentype in	Bovengrens van de slijtweg in het gekromde vlak als gevolg van rotaties om de y-as (m)					
0 11	een jaar voorkomt	w1a	w1b	w4a	w4b		
v11-75%	225000	37.83	37.9	38.77	38.83		
v11-25%	75000	22.36	22.4	22.9	22.94		
v12-75%	225000	70.58	70.69	72.31	72.39		
v12-25%	75000	40.75	40.82	41.77	41.82		
T11O2-75%	337500	104.82	104.97	107.38	107.53		
T11O2-25%	112500	53.69	53.77	55.04	55.12		
T11O3-75%	1125000	511.4	512.14	524.46	525.25		
T11O3-25%	375000	301.33	301.8	309.18	309.61		
V12A12-75%	112500	75.64	75.74	77.52	77.62		
V12A12-25%	37500	37.41	37.47	38.36	38.41		
T12O3A2-75%	225000	184.39	184.71	189.03	189.32		
T12O3A2-25%	75000	100.47	100.64	103	103.15		
	Totaal	1540.68	1543.06	1579.73	1582		

Tabel 26: Bovengrens van de jaarlijks optredende slijtweg van de bolsegment opleggingen als gevolg van rotaties om de y-as

Op vergelijkbare wijze zijn de rotaties om de y-as en de daaruit volgende slijtwegen vastgesteld voor de afdichtring van potopleggingen, de opleggingen van steunpunten 2 en 3. De straal R die nu in rekening wordt gebracht, is de straal van de ring in de oplegging. Voor de opleggingen w3a en w3b is deze gelijk aan 765.5mm.



Figuur 44: Straal van de afdichting

De verplaatsingen en slijtwegen als gevolg van rotatie Φ_y om de y-as, veroorzaakt door de afzonderlijke vrachtwagentypen, zijn vermeld in tabel 27 en 28.

Vrachtwagontunon	Slijtweg als gev	olg van rotaties om	de y-as m.b.t. de af	dichtring (mm)
vrachtwagentypen	w2a	w2b	w3a	w3b
v11-75%	0.0923	0.0923	0.0941	0.0940
v11-25%	0.1636	0.1637	0.1667	0.1667
v12-75%	0.1720	0.1721	0.1753	0.1753
v12-25%	0.2978	0.298	0.3036	0.3036
T1102-75%	0.1705	0.1706	0.1738	0.1737
T1102-25%	0.2622	0.2624	0.2672	0.2672
T1103-75%	0.2499	0.2500	0.2547	0.2546
T11O3-25%	0.4417	0.4420	0.4503	0.4502
V12A12-75%	0.3700	0.3703	0.3771	0.3770
V12A12-25%	0.5489	0.5493	0.5595	0.5594
T12O3A2-75%	0.4511	0.4514	0.4599	0.4597
T12O3A2-25%	0.7372	0.7377	0.7515	0.7513

 Tabel 27: Slijtweg in de potopleggingen

9. Gedrag van opleggingen als gevolg van statische verkeersbelasting

Vrachtwagentypen	Aantal keer dat een vrachtwagentype in	ntal keer dat een Bovengrens van de slijtweg m.b.t. de afdichtring a achtwagentype in gevolg van rotaties om de y-as (m)						
	een jaar voorkomt	w2a	w2b	w3a	w3b			
v11-75%	225000	20.76	20.77	21.16	21.16			
v11-25%	75000	12.27	12.28	12.51	12.50			
v12-75%	225000	38.70	38.72	39.45	39.44			
v12-25%	75000	22.34	22.35	22.77	22.77			
T11O2-75%	337500	57.54	57.58	58.65	58.63			
T11O2-25%	112500	29.50	29.52	30.06	30.06			
T11O3-75%	1125000	281.08	281.26	286.49	286.42			
T11O3-25%	375000	165.65	165.75	168.85	168.81			
V12A12-75%	112500	41.63	41.65	42.42	42.42			
V12A12-25%	37500	20.58	20.60	20.98	20.98			
T12O3A2-75%	225000	101.5	101.57	103.47	103.44			
T12O3A2-25%	75000	55.29	55.33	56.36	56.35			
	Totaal	846.84	847.38	863.17	862.96			

Tabel 28: Bovengrens van de jaarlijks optredende slijtweg van de potopleggingen als gevolg van rotaties om de y-as

Het is belangrijk te realiseren dat de waarden voor de slijtwegen voortkomen uit een model met individuele vrachtwagens en wrijvingsloze opleggingen. In de volgende paragraven zal worden onderzocht wat de invloed is van wrijving in de horizontale glijvlakken van de opleggingen, de volgafstand van vrachtwagens en het aantal vrachtwagens op de brug op hetzelfde tijdstip. Voor gekromde glijvlakken zullen deze invloeden niet worden beschouwd.

9.3. Invloed van wrijving in de opleggingen

Het is belangrijk te realiseren dat de invloedslijnen voortkomen uit een model, waarin wrijving buiten beschouwing is gelaten. Gezien het hoge eigen gewicht van de betonconstructie en de relatie tussen de normaalkracht op de oplegging en de wrijvingskracht in het glijvlak, is te verwachten dat wrijving wel degelijk een significante invloed zal hebben. De invloed van wrijving zal daarom nader worden bekeken.

De wrijvingskracht F_w tussen glijvlakken wordt bepaald door twee parameters, de wrijvingscoëfficiënt μ en de normaalkracht N op het glijvlak, waarmee: $F_w = \mu$ N. In paragraaf 3.2 is gesteld dat de waarde van de statische wrijvingscoëfficiënt mede afhankelijk is van de drukspanning en temperatuur. Hier zal een drukspanning in rekening worden gebracht, die het gevolg is van permanente belasting op de oplegging. Onder permanente belasting wordt verstaan, het eigen gewicht van de betonconstructie, asfalt, ballastbeton en schampkanten. Het is belangrijk om te realiseren dat de oplegreacties als gevolg van eigen gewicht, die bepaald worden met het eindige elementen model in Midas CIVII, gelden voor een monolithisch systeem. Aangezien we hier te maken hebben met een uitbouwbrug, hebben we niet te maken met een monolithisch systeem en zullen de oplegreacties in de praktijk verschillen. Na het sluiten van de laatste moot en het aanbrengen van de asfaltlaag, zal kruip van beton zorgen voor herverdeling van de momenten en verandering van oplegreacties.

In figuur 45 zijn de momentenlijnen voor het tijdstip net na het sluiten van de laatste moot (t = 0) en vele jaren na het in gebruik nemen van de brug (t = ∞) gegeven.



Figuur 45: Verandering van momenten als gevolg van kruip van beton

In tabel 29 zijn de waarden van de verticale oplegreacties vermeld, die volgen uit een tijdsafhankelijke berekening van het uitbouwproces uit het archief, uitgevoerd met behulp van Bouw. De asfaltlaag is aangebracht op tijdstip t = 360dagen, de start van het bouwproces is t = 0.

		Verticale oplegreactie Fz (kN)				
Tijd (dagen)	Tijd (jaren)	steunpunt 1	steunpunt 2	steunpunt 3	steunpunt 4	
360	0.986	-2040.492	-73229.297	-72121.367	-2552.867	
1000	2.740	-2265.340	-72912.906	-72005.102	-2698.355	
2000	5.479	-2308.520	-72879.281	-71936.422	-2740.441	
3000	8.219	-2308.578	-72893.469	-72018.703	-2734.461	
4000	10.960	-2349.957	-72853.938	-71976.828	-2766.422	
5000	13.700	-2357.869	-72954.281	-71956.875	-2769.047	
6000	16.438	-2375.609	-72802.188	-71941.125	-2784.363	
7000	19.178	-2404.020	-72856.500	-71905.578	-2808.773	
8000	21.918	-2405.000	-72794.219	-71906.000	-2801.160	
9000	24.658	-2395.441	-72802.781	-71969.656	-2792.770	
9990	27.370	-2403.910	-72788.063	-71918.969	-2798.676	
9999	27.395	-2416.605	-72785.938	-71867.609	-2806.801	

Tabel 29: Verticale oplegreactie per steunpunt vanaf moment dat asfalt is aangebracht

In de voorgaande tabel is te zien dat de verticale oplegreacties door kruip van beton in de loop der tijd veranderen. De mate waarin deze verandering plaats vindt neemt sterk af. Er is voor gekozen om met oplegreacties te rekenen die gelden voor t = 2000dagen. Met de oppervlakken A van de opleggingen en de normaalkracht N als gevolg van permanente belasting op t = 2000, kan de drukspanning worden bepaald met:

$$\sigma_{p}=\frac{N}{A}$$

Aan de hand van deze drukspanning kan de wrijvingscoëfficiënt per oplegging worden vastgesteld met behulp van figuur 11 of de overeenkomstige formule die gegeven is in paragraaf 3.2.

Deze formule voor een temperatuur van 10[°]C luidde:

$$\mu = \frac{8}{11} \cdot \frac{1.2}{(10 + \sigma_p)}$$

Tot slot zal de wrijvingskracht die een oplegging maximaal op kan nemen gelijk zijn aan: $F_w=\mu\cdot N$

De normaalkracht (op t = 2000dagen), het oppervlak en de daaruit volgende drukspanning, wrijvingscoëfficiënt en wrijvingskracht zijn voor de opleggingen van de Dintelhavenbrug vermeld in tabel 30. Hierbij is aangenomen dat de twee opleggingen van een steunpunt ieder de helft van de permanente verticale belasting op zal nemen (N = $0.5F_z$).

Onlegging	Normaal- kracht N (kN)	Diameter	Oppervlak	Drukspanning σ. (N/mm ²)	Wrijvings-	Wrijvings- kracht F (kN)
opicabilia		a (mm)			εσεπιμ	
w1a	1154.26	550	237583	4.86	0.059	68
w1b	1154.26	550	237583	4.86	0.059	68
w2a	36439.64	1580	1960668	18.59	0.031	1113
w2b	-	-	-	-	-	-
w3a	35968.21	1531	1840943	19.54	0.030	1063
w3b	35968.21	1580	1960668	18.34	0.031	1108
w4a	1370.22	580	264208	5.19	0.057	79
w4b	1370.22	560	246301	5.56	0.056	77

Tabel 30: Wrijvingscoëfficiënt en maximaal op te nemen wrijvingskracht per oplegging

Zolang de wrijvingskracht die opgebouwd kan worden in een glijvlak van een oplegging niet overschreden wordt door een horizontale kracht, zal er geen verplaatsing optreden. In tabel 30 is bijvoorbeeld te zien dat een horizontale kracht van minder dan 1113kN op opleggingen w2a, niet tot verplaatsingen zal leiden. Pas bij een horizontale kracht die groter is zal er verplaatsing optreden.

De horizontale kracht op de oplegging wordt veroorzaakt door het verkeer op de brug. Om te weten te komen welke horizontale krachten door het verkeer worden veroorzaakt, zijn alle opleggingen als vast beschouwd. Dit is representatief voor de situatie waarbij alle horizontale krachten de wrijving in de oplegging niet zullen overschrijden en er dus geen verplaatsingen zullen optreden. De horizontale krachten Fx en Fy die in deze situatie optreden in de opleggingen, de zogenaamde dwangkrachten, zijn opgenomen in bijlage I. Het betreft horizontale krachten als gevolg van de al eerder beschreven eenheidsaslast. In de grafieken van bijlage I zijn de grootste en kleinste horizontale kracht in x en y richting (langs- en dwarsrichting) voor iedere oplegging af te lezen. Deze grootste en kleinste waarden zijn in tabel 31 opgesomd.

Oplogging		Extreme dwan	gkrachten (kN)	
Opiegging	x richting (+)	x richting (-)	y richting (+)	y richting (-)
w1a	1.08	-0.77	0.09	-0.18
w1b	1.08	-0.77	0.18	-0.09
w2a	2.03	-1.27	0.31	-0.05
w2b	2.03	-1.27	0.05	-0.31
w3a	1.27	-2.03	0.31	-0.05
w3b	1.27	-2.03	0.05	-0.31
w4a	0.77	-1.08	0.09	-0.18
w4b	0.77	-1.08	0.18	-0.09

Tabel 31: Grootste en kleinste dwangkrachten

Opvallend hierin is dat bij de opleggingen van steunpunt 2 horizontale krachten in langsrichting van de brug kunnen ontstaan, die 2.03 keer zo groot is als de belasting die in verticale richting op de brug werkt. Daarentegen zijn de horizontale dwangkrachten die ontstaan in dwarsrichting van de brug een veel kleiner percentage van de belasting die in verticale richting op de brug werkt.

Om de werkelijke invloed van de wrijving te bepalen, is een indicatie nodig van de grootte van de dwangkrachten als gevolg van vrachtwagens. Als schatting voor deze dwangkrachten zijn de grafieken voor de dwangkracht als gevolg van de eenheidslast vermenigvuldigd met de totale last van een vrachtwagen. Door in dezelfde de grafiek de wrijvingskracht te plotten die een oplegging op kan nemen, is direct te zien of dwangkrachten wel of geen verplaatsing zullen veroorzaken. In figuur 46 zijn de grafieken voor de dwangkracht van oplegging w1a te zien.



Figuur 46: Dwangkrachten en wrijvingskracht oplegging w1a

De rood, paars en oranje gekleurde lijnen zijn de dwangkrachten in dwarsrichting van de brug en de blauw en groen gekleurde lijnen zijn de dwangkrachten in langsrichting van de brug, gegeven voor alle 12 vrachtwagentypen. De zwarte dikke lijnen geven de waarde van de wrijvingskracht aan voor deze oplegging. Deze wrijvingskracht als gevolg van alleen permanente belasting bedraagt $F_w = 68$ kN (tabel 30, oplegging w1a). Zoals enigszins is te verwachten voor deze stijve betonnen kokerbrug, zullen de dwangkrachten in dwarsrichting die worden veroorzaakt door de vrachtwagentypen niet groot genoeg zijn om deze wrijvingskracht te overwinnen. Daarentegen wordt de wrijvingskracht wel overwonnen door de dwangkrachten in langsrichting.

Net als oplegging w1a is ook het effect van wrijving voor oplegging w3a geanalyseerd. In figuur 47 zijn de grafieken voor de dwangkrachten en wrijvingskracht van oplegging w3a te zien. De wrijvingskracht voor deze oplegging als gevolg van alleen permanente belasting is aanzienlijk hoger, $F_w = 1063$ kN.



Figuur 47: Dwangkrachten en wrijvingskracht oplegging w3a

Nagenoeg alle dwangkrachten in zowel dwarsrichting als langsrichting zullen de wrijvingskracht in deze oplegging niet overwinnen. De twee uitzonderingen hierin zijn de dwangkrachten in langsrichting, veroorzaakt door de twee zwaarste vrachtwagentypen (V12A12-25% en T12O3A2-25%).

Een laatste punt van aandacht is het wrijvingsgedrag in driedimensionale zin. Het overwinnen van de wrijving door dwangkrachten in langsrichting, zorgt er voor dat verplaatsing in dwarsrichting op kan treden wanneer de dynamische wrijving wordt overwonnen. Hiermee wordt bedoeld, de wrijving die gerelateerd is aan de dynamische wrijvingscoëfficiënt, welke aanzienlijk lager is dan de statische wrijvingscoëfficiënt. Echter, zelfs deze lagere dynamische wrijving zal nauwelijks overwonnen worden door dwangkrachten veroorzaakt door de meeste vrachtwagentypen.

Wegens het feit dat de geometrie van de brug redelijk symmetrisch is en de belasting van het vrachtverkeer met een zeer kleine excentriciteit aangrijpt, zijn de lijnen voor de opleggingen van steunpunt 2 en 4 qua orde grootte vergelijkbaar met de hiervoor gegeven lijnen voor oplegging w1a en w3a.

9.4. Invloed van de volgafstand van vrachtwagens

Vooralsnog is gekeken naar resultaten als gevolg van individuele vrachtwagentypen. In de praktijk zullen regelmatig meerdere vrachtwagens op hetzelfde moment op de brug aanwezig zijn. Daarom is het zinvol om te onderzoeken wat voor effect de aanwezigheid van meer dan één vrachtwagen op de brug op hetzelfde tijdstip met zich mee brengt. Hiervoor kan gebruik worden gemaakt van het zelfde principe waarmee de resultaten voor de individuele vrachtwagentypen zijn bepaald (bijlage G). In dit geval worden de invloedslijnen voor individuele vrachtwagentypen gesommeerd, rekening houdend met een verschuiving op basis van de volgafstand. Zowel de invloed van de volgafstand als het aantal vrachtwagens op de brug zal worden onderzocht. De invloed van wrijving in de opleggingen is hierbij buiten beschouwing gelaten.

De invloed van de volgafstand op de slijtweg in langsrichting is onderzocht door te beginnen met een volgafstand van 30m tussen twee vrachtwagens, welke vervolgens met 10m is vergroot. Hierdoor zullen zich situaties voordoen waarbij de vrachtwagens in hetzelfde veld, op twee na elkaar volgende velden of in een verschillend randveld bevinden. Uiteindelijk is de volgafstand zo groot dat de voorste vrachtwagen de brug is gepasseerd en de achterste vrachtwagen de brug nog op moet rijden. Vanaf dit moment zal de totale slijtweg die de twee vrachtwagens veroorzaken constant blijven. Dit onderzoek is drie maal uitgevoerd, waarbij in één onderzoek steeds gebruik gemaakt is van twee vrachtwagens van hetzelfde vrachtwagentype.

In tabel 32 zijn de slijtwegen gegeven die veroorzaakt zijn door twee vrachtwagens van het type V11-75%, met een volgafstand die varieert van 30m tot 370m. De eerste waarde is gebaseerd op een aanname van de kortst mogelijk volgafstand en de tweede waarde volgt uit het feit dat de vrachtwagens zich niet meer tegelijkertijd op de brug zullen bevinden. Bij deze laatst genoemde situatie rijden de vrachtwagens afzonderlijk van elkaar over de brug en wordt de grootst mogelijke slijtweg veroorzaakt. Voor oplegging w3b bedraagt deze slijtweg 3.7069mm. De kleinste slijtweg voor oplegging w3b treedt op wanneer de vrachtwagens met een volgafstand van 130m over de brug rijden. De bijbehorende slijtweg bedraagt dan slechts 1.5753mm. Hieruit kan worden geconcludeerd dat er een maximale reductie van de slijtweg op kan treden van:

$$s_{red} = \left(1 - \frac{1.5753}{3.7069}\right) \cdot 100\% = 57.5\%$$

Volgafstand		Slijtwegen	in langsric	hting die o	ptreden bij	de opleggi	ingen (mm)	
tussen twee								
vrachtwagens	w1a	w1b	w2a	w2b	w3a	w3b	w4a	w4b
V11-75% (m)								
30	1.8453	1.8461	0	0	3.2290	3.2266	1.7018	1.7054
40	1.6985	1.6994	0	0	2.9663	2.9644	1.5572	1.5612
50	1.5726	1.5741	0	0	2.7151	2.7132	1.4218	1.4252
60	1.4679	1.4696	0	0	2.5158	2.5133	1.3087	1.3115
70	1.3807	1.3828	0	0	2.3513	2.3485	1.2154	1.2176
80	1.3190	1.3204	0	0	2.1990	2.1967	1.1253	1.1275
90	1.2860	1.2870	0	0	2.0521	2.0503	1.0667	1.0685
100	1.2724	1.2730	0	0	1.9045	1.9029	1.0395	1.0409
110	1.2860	1.2864	0	0	1.7566	1.7552	1.0425	1.0433
120	1.3370	1.3373	0	0	1.6144	1.6128	1.1590	1.1581
130	1.4274	1.4276	0	0	1.5773	1.5753	1.3496	1.3483
140	1.5257	1.5259	0	0	1.9516	1.9491	1.5291	1.5278
150	1.6119	1.6122	0	0	2.3058	2.3031	1.6825	1.6816
160	1.6869	1.6872	0	0	2.6040	2.6013	1.7857	1.7855
170	1.7704	1.7707	0	0	2.8417	2.8389	1.8506	1.8512
180	1.8574	1.8578	0	0	2.9926	2.9900	1.8896	1.8911
190	1.9243	1.9246	0	0	3.1228	3.1206	1.8995	1.9020
200	1.9710	1.9713	0	0	3.2442	3.2421	1.8946	1.8978
210	2.0096	2.0099	0	0	3.3564	3.3542	1.9057	1.9086
220	2.0437	2.0439	0	0	3.4560	3.4536	1.9173	1.9202
230	2.0737	2.0740	0	0	3.5415	3.5388	1.9243	1.9274
240	2.0994	2.0997	0	0	3.6111	3.6082	1.9235	1.9268
250	2.1197	2.1200	0	0	3.6627	3.6596	1.9147	1.9183
260	2.1360	2.1364	0	0	3.6941	3.6908	1.8964	1.9004
270	2.1445	2.1448	0	0	3.7039	3.7006	1.8712	1.8759
280	2.1435	2.1439	0	0	3.6904	3.6870	1.8476	1.8529
290	2.1354	2.1359	0	0	3.6527	3.6494	1.8592	1.8617
300	2.1183	2.1187	0	0	3.5903	3.5871	1.9256	1.9273
310	2.0922	2.0927	0	0	3.5042	3.5011	1.9815	1.9828
320	2.0681	2.0686	0	0	3.4198	3.4169	2.0144	2.0156
330	2.0789	2.0792	0	0	3.4264	3.4234	2.0342	2.0361
340	2.1023	2.1026	0	0	3.5311	3.5278	2.0356	2.0380
350	2.1330	2.1333	0	0	3.6564	3.6530	2.0355	2.0378
360	2.1484	2.1487	0	0	3.7102	3.7069	2.0385	2.0408
370	2.1484	2.1487	0	0	3.7102	3.7069	2.0385	2.0408

Tabel 32: Slijtwegen veroorzaakt door twee vrachtwagens van het type V11-75% metverschillende volgafstanden

De invloed van de volgafstand tussen twee vrachtwagens komt nog beter tot uiting in figuur 48. In deze figuur is de grafiek te zien van de ontwikkeling van de slijtweg van oplegging w3b voor verschillende volgafstanden. Wanneer de vrachtwagens relatief dicht achter elkaar rijden wordt na ruim 15s de eindwaarden van de slijtweg bereikt. Ook in de grafiek is te zien dat de kleinste slijtweg wordt bereikt wanneer de twee vrachtwagens met een volgafstand van 130m over de brug rijden. Het enorme verschil tussen de grootste en kleinste waarde van de slijtweg die twee vrachtwagens kunnen veroorzaken is duidelijk zichtbaar. De eindwaarden van de slijtwegen komen overeen met de waarden die vermeld zijn in de kolom van oplegging w3b in tabel 32.



Figuur 48: Ontwikkeling van de slijtweg in langsrichting van oplegging w3b veroorzaakt door twee vrachtwagens van het type V11-75% met verschillende volgafstanden

In deze bijlage J1 zijn de resultaten gegeven voor drie vergelijkbare onderzoeken die uitgevoerd zijn met andere vrachtwagentypen. Gekeken is naar de invloed van de volgafstand voor twee vrachtwagens van het type T11O3-75%, twee vrachtwagens waarbij de voorste van het type T11O3-75% en de achterste van het type T11O3-25% en twee vrachtwagens waarbij de voorste van het type T11O3-25% en de achterste van het type T11O3-75%.

Uit deze onderzoeken zijn de volgende conclusies getrokken:

- 1) De volgafstand beïnvloed de reductie van de slijtweg, veroorzaakt door twee identieke vrachtwagentypen, met dezelfde orde.
- 2) De invloed van de volgafstand op de reductie van de slijtweg is kleiner, wanneer de slijtweg veroorzaakt wordt door twee verschillende vrachtwagentypen, dan wanneer de slijtweg veroorzaakt wordt door twee identieke vrachtwagentypen.
- 3) De volgorde van twee vrachtwagens van een verschillend type, heeft geen invloed op de reductie van de slijtweg.

9.5. Invloed van het aantal vrachtwagens

De voorgaande onderzoeken met betrekking tot de volgafstand zijn uitgevoerd voor situatie met twee vrachtwagens. In deze paragraaf zal het resultaat worden beschreven van een onderzoek met twee en meer vrachtwagens. Achtereenvolgens zijn twee, drie, vier en vijf vrachtwagens achter elkaar de brug gepasseerd, waarbij de volgafstand tussen de vrachtwagens constant is gehouden en de vrachtwagens van hetzelfde typen zijn. De vrachtwagens zijn van het type T11O3-75% en afhankelijk van het aantal vrachtwagens worden de onderstaande slijtwegen gevonden.

					Slijtwegen in langsrichting die optreden bij de opleggingen					
Aantal vrachtwagens	Volgafstand 1-2 (m	Volgafstand 2-3 (m	Volgafstand 3-4 (m	Volgafstand 4-5 (m	w1a	w1b	w3a	w3b	w4a	w4b
2	360	-	-	-	5.80104	5.80200	10.0269	10.0180	5.49238	5.49842
3	360	360	-	-	8.70155	8.70300	15.0404	15.0270	8.23858	8.24764
4	360	360	360	-	11.6021	11.6040	20.0538	20.0359	10.9848	10.9968
5	360	360	360	360	14.5026	14.5050	25.0673	25.0449	13.7310	13.7461
2	50	-	-	-	3.9765	3.9798	6.9017	6.8955	3.5737	3.5825
3	50	50	-	-	4.2037	4.2075	7.3962	7.3908	3.722	3.7328
4	50	50	50	-	4.3189	4.3243	6.6514	6.6454	4.0041	4.0082
5	50	50	50	50	4.9141	4.921	7.5934	7.5877	4.2785	4.2868
2	50	-	-	-	3.9765	3.9798	6.9017	6.8955	3.5737	3.5825
3	50	75	-	-	4.1801	4.1831	6.3363	6.3317	3.5755	3.5815
4	50	75	50	-	4.9029	4.9055	7.2843	7.2787	4.5174	4.5241
5	50	75	50	50	5.6582	5.6637	8.8498	8.8401	4.9112	4.9242
2	50	-	-	-	3.9765	3.9798	6.9017	6.8955	3.5737	3.5825
3	50	100	-	-	4.6266	4.629	6.5449	6.5409	4.2881	4.291
4	50	100	50	-	5.9933	5.9973	9.1359	9.1293	5.6274	5.6332
5	50	100	50	50	6.5695	6.5747	10.5214	10.5165	5.748	5.7566
2	50	-	-	-	3.9765	3.9798	6.9017	6.8955	3.5737	3.5825
3	50	125	-	-	5.4179	5.4206	8.0103	8.0035	5.2725	5.2776
4	50	125	50	-	6.8424	6.8478	11.6373	11.6259	6.4402	6.452
5	50	125	50	50	7.0912	7.0973	12.2366	12.2255	6.5591	6.5728
2	50	-	-	-	3.9765	3.9798	6.9017	6.8955	3.5737	3.5825
3	50	150	-	-	6.1228	6.126	9.7859	9.7777	5.8289	5.8403
4	50	150	50	-	7.375	7.3807	12.7759	12.7625	6.5754	6.5941
5	50	150	50	50	7.6298	7.6363	13.2716	13.259	6.7174	6.7379
2	50	-	-	-	3.9765	3.9798	6.9017	6.8955	3.5737	3.5825
3	50	175	-	-	6.4046	6.408	10.884	10.8766	5.8369	5.8488
4	50	175	50	-	7.5987	7.6053	13.2616	13.2501	6.4745	6.4907
5	50	175	50	50	7.8257	7.8328	13.7554	13.7446	6.6267	6.6448

Tabel 33: Slijtwegen in langsrichting als gevolg van meerder vrachtwagens en verschillendevolgafstanden, met alle vrachtwagens van het type T11O3-75%

Om inzicht te krijgen in de mate waarmee de slijtweg gereduceerd wordt, in vergelijking met de situatie wanneer de vrachtwagens één voor één de brug zouden passeren, zijn de reducties van de slijtwegen uitgedrukt in percentages (zie bijlage J2). De grootste reducties bedragen zo'n 69% voor de opleggingen van steunpunt 3 en 4. Deze reductie vindt plaats voor een situatie waarbij 5 vrachtwagens (allen type T11O3-75%) met een volgafstand van 50m over de brug rijden. Ook is duidelijk te zien dat de reductie groter is naarmate er meer vrachtauto's tegelijkertijd over de brug rijden. Het gemiddelde reductiepercentage bedraagt zo'n 45%.

Om meer waarde te kunnen hechten aan de voorgaande conclusies zijn nog enkele slijtwegen bepaald voor situaties met oplopende volgafstanden, zoals vermeld in de volgende tabel.

				Slijtwegen in langsrichting die optreden bij de opleggingen (mm)					n (mm)
Aantal vrachtwagens	Volgafstand 1-2 (m)	Volgafstand 2-3 (m)	Volgafstand 3-4 (m)	w1a	w1b	w3a	w3b	w4a	w4b
2	360	-	-	5.80104	5.80200	10.0269	10.0180	5.49238	5.49842
3	360	360	-	8.70155	8.70300	15.0404	15.0270	8.23858	8.24764
4	360	360	360	11.6021	11.6040	20.0538	20.0359	10.9848	10.9968
2	80	-	-	3.4281	3.4296	5.6822	5.6771	2.9108	2.9162
3	80	80	-	4.0207	4.0228	5.9398	5.9363	3.7597	3.7621
4	80	80	80	4.9841	4.9869	7.2121	7.2075	4.1912	4.1982
2	90	-	-	3.3699	3.3709	5.2875	5.2828	2.8064	2.8106
3	90	90	-	4.1940	4.1948	6.1456	6.1401	3.5443	3.5505
4	90	90	90	4.9704	4.9718	6.7194	6.7128	4.0963	4.0987
2	100	-	-	3.3831	3.3837	4.8861	4.8820	2.7756	2.7783
3	100	100	-	4.2941	4.2941	6.1429	6.1406	3.2474	3.2538
4	100	100	100	5.0384	5.0380	6.7578	6.7567	3.9304	3.9368
2	110	-	-	3.4896	3.4894	4.4837	4.4797	2.9320	2.9300
3	110	110	-	4.5444	4.5437	5.7806	5.7770	3.3177	3.3192
4	110	110	110	5.5992	5.5980	7.0775	7.0744	3.7034	3.7085
2	120	-	-	3.7148	3.7151	4.1507	4.1446	3.4445	3.4412
3	120	120	-	4.9518	4.9520	5.2690	5.2621	4.0046	3.9986
4	120	120	120	6.1888	6.1888	6.3873	6.3795	4.5648	4.5559

Tabel 34: Slijtwegen in langsrichting als gevolg van meerder vrachtwagens en verschillendevolgafstanden, met alle vrachtwagens van het type T1103-75%

Ook voor dit onderzoek zijn de reducties van de slijtwegen uitgedrukt in percentages (zie bijlage J2). Wederom worden grote reducties (68%) van de slijtweg geconstateerd en is duidelijk te zien dat de reductie groter is naarmate er meer vrachtauto's tegelijkertijd over de brug rijden. De gemiddelde reductie van de slijtweg per oplegging varieert nu van 47.77% voor w1a tot 59.39 voor w3a.

Uit de voorgaande waarden van de slijtwegen en de percentages voor de reductie van de slijtwegen, kan worden geconcludeerd dat het aantal vrachtwagens in combinatie met de volgafstanden een grote invloed heeft op de reductie van de slijtweg. Het afzonderlijk over de brug rijden van 3, 4 of 5 vrachtwagens in vergelijking met het tegelijkertijd over de brug rijden van deze aantallen vrachtwagens, laat zien dat er reducties van de slijtwegen op kunnen treden van 69%. De gemiddelde reducties van de verschillende opleggingen bedragen zo'n 50%.

Op basis van dit gemiddelde percentage kan een ondergrens worden vastgesteld voor de slijtweg voor een oplegging die gedurende een jaar plaats vindt. Van de waarden van de bovengrens uit tabel 24 is het gemiddelde percentage (50%) genomen (tabel 35).

Oplegging	Bovengrens van de slijtweg per jaar in langsrichting (m)	Ondergrens van de slijtweg per jaar in langsrichting (m)
w1a	9826.107413	4913.053707
w1b	9827.737613	4913.868807
w4a	9304.517175	4652.258588
w4b	9315.049350	4657.524675

Tabel 35: Ondergrens en bovengrens van de slijtweg per jaar

De waarden voor de bovengrens waren vastgesteld voor de situatie waarbij de wrijving in de opleggingen buiten beschouwing was gelaten. Zodoende gelden de waarden voor de ondergrens van de slijtweg ook voor de situatie waarbij geen wrijving in de oplegging is meegenomen. In de volgende paragraaf wordt een overzicht gegeven van alle conclusies met betrekking tot de slijtweg.

Met een vergelijkbare onderzoek is gebleken dat de rotatie Φ_y , veroorzaakt door drie vrachtwagens van het type T12O3A2-25% met een volgafstand van 30m, kan toenemen tot 0.0006rad. Dit betekent een verdubbeling van de waarde die werd gevonden voor een individuele vrachtwagen van dit type die de brug passeert.

9.6. Conclusies

In dit hoofdstuk zijn meerder situaties beschouwd waaruit verschillende resultaten en conclusies werden getrokken. Allereerst is gekeken naar de reactiekrachten, verplaatsingen, rotaties, snelheden van verplaatsingen en slijtwegen van de opleggingen, veroorzaakt door ieder afzonderlijke vrachtwagentype. In de opleggingen is hierbij wrijving buiten beschouwing gelaten. Op basis van deze resultaten kan worden geconcludeerd dat verplaatsingen en slijtwegen in dwarsrichting en rotaties om de x-as en z-as (as in langs en verticale richting) verwaarloosbaar zijn. Dit was ook enigszins te verwachten vanwege de grote stijfheid van de betonnen kokerbrug. Daarnaast zijn de verticale reactiekrachten bij de opleggingen van de middensteunpunten veroorzaakt door het zwaarste vrachtwagentype op zijn hoogst zo'n 500kN, terwijl de verticale reactie als gevolg van het eigen gewicht bij deze opleggingen ongeveer 36000kN bedraagt. De zwaarste vrachtwagen zorgt dus voor een toename van 1.014% van de verticale reactiekracht, wat als verwaarloosbaar kan worden gezien. De verticale reactiekrachten voor de opleggingen van de eindsteunpunten zijn niet verwaarloosbaar, aangezien de reactiekracht veroorzaakt door het eigen gewicht van de constructie daar veel lager is. Voor enkele parameters was dit eerste onderzoek voldoende voor het verkrijgen van een indicatie van de orde grootte, voor andere parameters was een uitgebreider onderzoek noodzakelijk.

In de volgende tabel volgt een overzicht voor welke parameters achtereenvolgens verwaarloosbare waarden werden verkregen, een indicatie van de orde van grootte voldoende was en waarvoor uitgebreider onderzoek noodzakelijk werd geacht.

Parameter	Symbool	Beoordeling
Reactiekrachten in langsrichting	F _x	Indicatie
Reactiekrachten in dwarsrichting	Fy	Indicatie
Reactiekrachten in vert. richting eindsteunpunt	Fz	Indicatie
Reactiekrachten in vert. richting middensteunpunt	Fz	Verwaarloosbaar
Verplaatsingen in langsrichting	u _x	Indicatie / Onderzoek
Verplaatsingen in dwarsrichting	u _y	Indicatie / Onderzoek
Rotaties om de as in langsrichting	$\Phi_{\rm x}$	Verwaarloosbaar
Rotaties om de as in dwarsrichting	Φ_{y}	Indicatie
Rotaties om de as in verticale richting	Φ_{z}	Verwaarloosbaar
Slijtwegen in langsrichting	S _x	Indicatie / Onderzoek
Slijtwegen in dwarsrichting	Sy	Indicatie / Onderzoek
Snelheden in langsrichting	V _x	Onderzoek
Snelheden in dwarsrichting	Vy	Onderzoek

Tabel 36: Beoordeling van parameters, op basis van het beschouwen van afzonderlijke vrachtwagentypen voor opleggingen zonder wrijving

De waarden van de parameters waarvoor een eerste indicatie is verkregen, zijn beschreven in paragraaf 9.2 en af te lezen in de grafieken van bijlage H. Voor de verplaatsingen, welke gerelateerd zijn aan de slijtwegen en snelheden, was verder onderzoek noodzakelijk. Dit verder onderzoek bestond uit het in rekening brengen van de wrijving in de opleggingen.

Voor iedere oplegging is bepaald welke wrijvingskracht opgenomen kan worden en bij welke opleggingen de wrijving kan worden overwonnen. Hiervoor is gekeken naar de horizontale krachten (dwangkrachten) die ieder vrachtwagentype veroorzaakt. Het blijkt voor alle opleggingen zo te zijn dat er niet of nauwelijks verplaatsingen in dwarsrichting optreden. Deze verplaatsingen en corresponderende slijtwegen en snelheden kunnen daarom als verwaarloosbaar worden beschouwd. Verrassender zijn de uitkomsten voor de verplaatsingen in langsrichting. Bij de opleggingen van de middensteunpunten is de wrijvingskracht die door de opleggingen opgenomen kan worden zo groot, dat de horizontale krachten die door tien van de twaalf vrachtwagentypen worden veroorzaakt, niet groot genoeg zijn om verplaatsingen op te laten treden. Bij de opleggingen van de eindsteunpunten ontstaan horizontale krachten, die wel groot genoeg zijn om de wrijving te overwinnen. De parameters die nog nader onderzocht dienden te worden, werden na het in rekening brengen van de wrijving als volgt beoordeeld (tabel 37).

Parameter	Symbool	Beoordeling
Verplaatsingen in langsrichting	u _x	Indicatie
Verplaatsingen in dwarsrichting	u _y	Verwaarloosbaar
Slijtwegen in langsrichting	S _x	Indicatie / Onderzoek
Slijtwegen in dwarsrichting	Sy	Verwaarloosbaar
Snelheden in langsrichting	V _x	Onderzoek
Snelheden in dwarsrichting	Vy	Verwaarloosbaar

Tabel 37: Beoordeling parameters, op basis van het beschouwen opleggingen met wrijving

Na het beschouwen van wrijving in de opleggingen is dus gebleken dat verplaatsingen in dwarsrichting niet of nauwelijks optreden, verplaatsingen in langsrichting in beperkte mate optreden bij de middensteunpunten en verplaatsingen in langsrichting wel optreden bij de eindsteunpunten. Vervolgens kon uit het product van de verplaatsingen als gevolg van de afzonderlijke vrachtwagentype en het aantal keer dat een vrachtwagentype in een jaar voorkomt, de bovengrens van de slijtweg in langsrichting van een oplegging in een jaar worden vastgesteld. Voor het vaststellen van een ondergrens van de slijtweg, was verder onderzoek noodzakelijk. Dit is gedaan door statische simulaties uit te voeren in Excel, waarbij meerdere vrachtwagens tegelijkertijd de brug passeren. Hierbij is gevarieerd in volgafstanden tussen de vrachtwagens. Gebleken is dat de slijtweg bij de aanwezigheid van meerdere vrachtwagens op de brug, met een volgafstand van zo'n 110m a 120m, met wel 69% kan reduceren. Voor de verschillende situaties die zijn onderzocht qua aantal vrachtwagens en variaties in volgafstanden, is voor iedere oplegging de gemiddelde reductie van de slijtweg bepaald. De gemiddelde reducties van de verschillende opleggingen bleken zo'n 50% te bedragen. De bovengrens en ondergrens van de slijtwegen in langsrichting zijn vermeld in tabel 35. Om een meer betrouwbare uitspraak te kunnen doen over de ondergrens van de slijtwegen, is het zinvol om een uitgebreide verkeerssimulatie uit te voeren. Met een uitgebreide verkeerssimulatie kan onderzoek worden gedaan naar de volgafstanden van vrachtwagens en het aantal vrachtwagens dat zich tegelijkertijd op de brug bevinden.

De laatste parameter waar nog onderzoek naar gedaan dient te worden, is de snelheid waarmee de verplaatsing in langsrichting optreedt. In dit paragraaf 9.2 zijn ter indicatie enkele waarden voor de snelheid genoemd, welke gebaseerd zijn op verplaatsingen in langsrichting voor een situatie waarbij geen wrijving in de opleggingen in rekening is gebracht. Echter, wanneer wel wrijving in rekening gebracht wordt, zal de verplaatsing in eerste instantie tegen kunnen worden gegaan. Bij het overwinnen van de wrijving treedt de verplaatsing uiteindelijk toch op, alleen met een andere (naar verwachting hogere) snelheid. Met andere woorden, om een nog beter oordeel te kunnen geven over de snelheid waarmee verplaatsingen daadwerkelijk optreden, is het noodzakelijk om de wrijving nauwkeurig in rekening te brengen. Daarentegen geven de waarden die in dit hoofdstuk zijn bepaald wel een goede indicatie van de orde grootte van de snelheid waarmee de verplaatsingen optreden.

In het volgende hoofdstuk is beschreven wat de resultaten zijn wanneer de wrijving op een realistischere wijze in rekening wordt gebracht. Daarnaast zijn dynamische analyses uitgevoerd voor alle vrachtwagentypen uit het model FLM M [75/25]. Hiermee kan meer inzicht worden verkregen in de dynamische vergrotingsfactor ten opzichte van de resultaten die met statische analyses zijn gevonden. De resultaten hiervan worden in het volgende hoofdstuk toegelicht.

10. GEDRAG VAN OPLEGGINGEN ALS GEVOLG VAN DYNAMISCHE VERKEERSBELASTING

10.1. Dynamische verkeersbelasting

De wijze waarop dynamische belasting in rekening gebracht kan worden is in voorgaande hoofdstukken gesproken. Daarbij is tevens vastgesteld van welke oplossingsmethode en parameters met betrekking tot demping en tijdstap gebruik gemaakt zal worden (zie Hoofdstuk 8). Met behulp van die gegevens is voor ieder vrachtwagentype een dynamische analyse uitgevoerd. Hierbij gaat nu vooral de aandacht uit naar de verplaatsingen in langsrichting. De verplaatsingen zijn uitgezet in de tijd, waarbij de vrachtwagens de brug passeren met een snelheid van 90km/h. In bijlage K zijn de grafieken gegeven van de verplaatsing in langsrichting van drie opleggingen, veroorzaakt door vrachtwagentype V11-75%. In dezelfde figuren zijn ter vergelijking de grafieken geplot voor de statische verplaatsing.

Echter, men kan zich afvragen hoeveel waarde aan de dynamische verplaatsingen in langsrichting gehecht moet worden. In de grafieken (bijlage K1) is een onrustig gedrag terug te zien. Of dit gedrag ook daadwerkelijk optreedt kan in twijfel worden genomen. Het is niet waarschijnlijk dat dergelijke snelle verplaatsingen bij de opleggingen op zullen treden. Het trillende gedrag is tevens te constateren in de verticale oplegreacties (bijlage K2). Door gebruik te maken van 'Friction Pendulum System Isolators' kunnen deze trillingen worden weggedempt. De FPS Isolator kan tevens gebruikt worden om wrijving te modelleren, waarvan de werking is aangetoond in bijlage B.

Om het trillende gedrag van de verplaatsingen bij de opleggingen uit te dempen en om wrijving in rekening te brengen, zijn bij iedere oplegging FPS Isolators in het eindige elementen model van de Dintelhavenbrug opgenomen. Met dit model zijn dynamische analyses uitgevoerd, waarmee echter geen gewenste resultaten zijn verkregen. Het trilgedrag blijft aanwezig en het verloop van de verplaatsingen verschillen zo van de statische resultaten dat deze als onjuist kunnen worden beschouwd. De reden hiervoor ligt bij het feit dat, zoals al eerder geconcludeerd, een aantal waarden voor de parameters van de FPS Isolator op iteratieve wijze bepaald dienen te worden. Het bepalen van de waarden van de parameters en het beoordelen of de verkregen resultaten betrouwbaar zijn is erg complex. Daarom wordt aanbevolen een aparte studie te doen, indien betrouwbare resultaten van het dynamische gedrag en wrijving in de opleggingen gewenst zijn.

10.2. Dynamische vergrotingsfactor

In de vorige paragraaf is beschreven welke resultaten worden verkregen, bij het uitvoeren van dynamische analyses waarbij de individuele vrachtwagentypen de brug passeren met een snelheid van 90km/h. Wrijving in de opleggingen is hierbij buiten beschouwing gelaten. Onder andere in de grafieken voor de verplaatsingen in langsrichting is een trillend gedrag zichtbaar. Om betrouwbare gegevens te verkrijgen voor verplaatsingen in langsrichting en om wrijving in de oplegging in het model op te nemen, wordt aanbevolen daar aparte studies naar te doen.

Ondanks de twijfel over de resultaten die zijn gevonden, is ter indicatie de slijtweg bepaald voor de dynamische verplaatsing in langsrichting. De waarden hiervan zijn gegeven in tabel 38. In deze tabel zijn tevens de slijtwegen vermeld die al eerder waren bepaald op basis van de statische verplaatsingen (zie paragraaf 9.2 tabel 22). Met de zogenaamde dynamische vergrotingsfactor (DVF) wordt in procenten het verschil in grootte uitgedrukt tussen resultaten die volgen uit een statische en dynamische analyse. In het kader van dit onderzoek is het interessant om te weten hoe groot deze factor is, om zo inzicht te krijgen in welke mate bijvoorbeeld de slijtweg toe kan nemen.

Oplegging	Slijtweg statisch	Slijtweg dynamisch	DVF (%)
w1a	1.073889	1.428857242	33.05
w3a	1.853760	2.191846313	18.24
w4a	1.018193	1.370174029	34.57

Tabel 38: Slijtwegen voor statische en dynamische verplaatsingen in langsrichtng en debijbehorende DVF

Echter, vanwege het trilgedrag in de verplaatsingen in langsrichting zullen de DVF onbetrouwbaar en waarschijnlijk groter zijn, dan in werkelijkheid het geval is. Daarnaast is het vaststellen van een DVF een studie op zich. In het verleden is onderzoek gedaan naar de dynamische interacties tussen voertuig en betonnen eencellige kokerliggerbruggen [16]. Het betrof een deel (442m) van de 12.9km lange Confederation Bridge, vergelijkbaar met de Dintelhavenbrug, met zijoverspanningen van 96m en een hoofdoverspanning van 250m. De hoogte van de koker varieert van 4.5m in het midden van de overspanning tot 14m ter hoogte van de pijlers. Voor deze brug zijn de invloeden van voertuigaspecten op de grootte van de DVF onderzocht, voor de doorbuiging van het midden van de hoofdoverspanning. De voertuigaspecten die zijn beschouwd zijn de voertuigsnelheid, massa van een voertuig en de positie van een voertuig op de brug in combinatie met variatie in het aantal voertuigen.

Uit dit onderzoek zijn de volgende conclusies getrokken:

- 1) Excentrische verkeersbelasting zorgt voor een grotere DVF dan centrische verkeersbelasting.
- 2) Een groter aantal vrachtwagens op de brug kan resulteren in een grotere DVF.
- 3) Het verdelen van vrachtwagens over meerder rijstroken kan de dynamische response van de brug reduceren.
- 4) In het algemeen heeft de DVF de neiging groter te worden voor een hogere voertuigsnelheid. Voor lagere voertuigsnelheden vertoont de DVF minder schommeling. De relatie tussen de voertuigsnelheid en de DVF is gegeven in figuur 49. Het gaat hierbij om de lijn van de Confederation Bridge, de overige lijnen zijn gerelateerd aan een drietal kortere bruggen die eveneens in dit onderzoek waren betrokken. Even als deze conclusies volgt deze figuur uit [16].



Figuur 49: Relatie tussen de voertuigsnelheid en de DVF

5) Een grotere voertuigmassa kan zowel zorgen voor een toename als afname van de DVF, afhankelijk van de snelheid waarmee de vrachtwagen over de brug rijdt. De relatie tussen de massa en DVF voor verschillende voertuigsnelheden is gegeven in figuur 50.



Figuur 50: Relatie tussen voertuigmassa en de DVF

Op basis van de hiervoor beschreven invloeden op de DVF en het trilgedrag in de verplaatsingen in langsrichting die uit de dynmische analyses volgen, is besloten geen waarden voor de DVF vast te stellen en in rekening te brengen. Om waarde te kunnen hechten aan de grote van de DVF is het noodzakelijk de DVF te bepalen voor situaties met verschillende voertuigsnelheden, aantal vrachtwagens en excentriciteiten van een vrachtwagen ten opzichte van de as van de koker. Het mag duidelijk zijn dan dit een op zichzelf staande en tijdrovende studie is.

11. GEDRAG VAN OPLEGGINGEN ALS GEVOLG VAN THERMISCHE BELASTING

11.1. Thermische invloeden modelleren met Midas CIVIL

In de voorgaande hoofdstukken is beschreven welke verplaatsingen, rotaties en krachten de opleggingen te verwerken krijgen als gevolg van verkeersbelasting. Een tweede en tevens laatste belasting die zal worden beschouwd is thermische belasting. Zowel de jaarlijkse temperatuurwisseling als het dagelijkse temperatuurverschil zal worden beschouwd, uitgedrukt in gelijkmatige temperatuurcomponenten en horizontale en verticale temperatuurverschilcomponenten (zie hoofdstuk 6).

In Midas CIVIL zijn thermische invloeden in rekening te brengen door temperatuurverschillen ΔT aan knopen toe te wijzen. Om inzicht te krijgen in het modelleren van thermische invloeden en de nauwkeurigheid van de resultaten, is gebruik gemaakt van een ligger op drie steunpunten. Voor deze ligger zijn de oplegreacties en vervorming bepaald, als gevolg van temperatuurbelasting (bijlage L).

Op identieke wijze als voor de ligger op drie steunpunten, kunnen de temperatuurverschillen ΔT aan de knopen van het model van de Dintelhavenbrug worden toegewezen. De reactie van een materiaal op een temperatuurwisseling is afhankelijk van de materiaaleigenschappen. De waarden voor de materiaaleigenschappen van beton die in rekening zijn gebracht zijn achtereenvolgens $\alpha = 1 \cdot 10^{-5} \, ^{\circ} C^{-1}$ voor de lineaire uitzettingscoëfficiënt en E = $3.93 \cdot 10^7 \text{kN/m}^2$ voor de elasticiteitsmodulus. In de volgende paragraaf zal onderzocht worden welke verplaatsingen de opleggingen te verwerken krijgen door de jaarlijkse temperatuurwisseling. De invloed van de dagelijkse temperatuurverschillen worden in de paragraaf die daarna volgt besproken.

11.2. Jaarlijkse temperatuurwisseling

De waarde van ΔT voor de jaarlijkse temperatuurwisseling is gelijkmatig verdeeld over de hoogte van de doorsnede (figuur 51).



Figuur 51: Uiterste jaarlijkse temperaturen

De initiële temperatuur die aan alle knopen wordt toegewezen is 10° C en de eind temperatuur voor alle knopen is $T_{e,max} = 32^{\circ}$ C voor het warmste moment respectievelijk $T_{e,min} = -17^{\circ}$ C voor het koudste moment in een jaar.

Het verplaatsingscontour van de brug voor de maximale temperatuur in een jaar is gegeven in de volgende figuren. In figuur 52 is te zien dat er geen verplaatsing in langsrichting optreedt ter hoogte van steunpunt 2, het vaste punt (blauwe kleur). Alle andere punten rondom dit vaste punt verplaatsen wel, hoe groter de afstand tot het vaste punt hoe groter de verplaatsing. Bij steunpunt 4 zal de verplaatsing in langsrichting dus het grootst zijn.



Figuur 52: Vooraanzicht verplaatsingscontour voor de maximale jaarlijkse temperatuur

Ter controle is de orde grootte van de verplaatsing in langsrichting die optreedt bij steunpunt 4 analytisch bepaald.

De rek in de gehele constructie is gelijk aan: $\epsilon \!=\! \alpha \!\cdot\! \Delta T_{_{N,exp}} \!=\! 1 \!\cdot\! 10^{^{-5}} \!\cdot\! 22 \!=\! 22 \!\cdot\! 10^{^{-5}}$

De verplaatsing is afhankelijk van de afstand tot aan het vaste punt. Steunpunt 4, ter hoogte van het rechter landhoofd, ligt op een afstand van 184.95 + 86.5 = 271.45m. De verplaatsing is gelijk aan:

 $\Delta L = Dx = \epsilon \cdot L = 22 \cdot 10^{-5} \cdot 271.45 \cdot 10^{3} = 59.719 \text{mm}$

Deze waarde is nagenoeg gelijk aan de verplaatsing die met Midas CIVIL wordt gevonden (zie legenda figuur 52, waarde voor de rode kleur is 59.97116mm).



De dwarsdoorsnede van steunpunt 3 (figuur 53) laat zien dat oplegging w3a wel verplaatsing in dwarsrichting vertoont, terwijl oplegging w3b op zijn plaats blijft.

Figuur 53: Dwarsdoorsnede steunpunt 3 verplaatsingscontour voor de maximale jaarlijkse temperatuur

De verplaatsingen en rotaties die de opleggingen te verwerken krijgen als gevolg van de maximale jaarlijkse temperatuur zijn gegeven in tabel 39.

Oplegging	Dx (mm)	Dy (mm)	Dz (mm)	Rx (rad)	Ry (rad)	Rz (rad)
w1a	-18.915827	1.426237	0.000000	-0.000059	-0.000082	0.000006
w1b	-18.924225	0.000000	0.000000	0.000058	-0.000084	-0.000009
w2a	0.000000	1.211835	0.000000	0.000031	-0.000003	-0.000001
w2b	0.000000	0.000000	0.000000	-0.000030	-0.000004	-0.000000
w3a	40.594148	1.216252	0.000000	0.000037	0.000004	0.000001
w3b	40.598893	0.000000	0.000000	-0.000036	0.000004	0.000001
w4a	59.507430	1.426334	0.000000	-0.000061	0.000082	-0.000008
w4b	59.513584	0.000000	0.000000	0.000059	0.000084	0.000009

Tabel 39: Verplaatsingen als gevolg van de maximale jaarlijkse temperatuur

Ter controle is ook de verplaatsing in dwarsrichting gecontroleerd. De verplaatsing in dwarsrichting van oplegging w2a wordt bepaald door de rek in de constructie en de afstand tot het vaste punt, oplegging w2b. Uit figuur 5 en 8 van hoofdstuk 2 is af te leiden dat de onderlinge afstand tussen oplegging w2a en w2b gelijk is aan 5540mm, zodat de zijdelingse verplaatsing van oplegging w2a gelijk is aan:

 $Dy = \epsilon \cdot L = 22 \cdot 10^{-5} \cdot 5540 = 1.2188mm$ (Midas CIVIL geeft 1.211835, tabel 39)

De oplegreacties die de opleggingen te verwerken krijgen als gevolg van de maximale jaarlijkse temperatuur zijn gegeven in tabel 40.

Oplegging	Fx (kN)	Fy (kN)	Fz (kN)
w1a	0.000000	0.000000	-4.208898
w1b	0.000000	2.036151	9.592708
w2a	-38.742171	0.000000	7.017762
w2b	38.783490	-1.533429	-12.205389
w3a	0.000000	0.000000	6.238781
w3b	0.000000	-1.150098	-12.238264
w4a	0.000000	0.000000	-3.912626
w4b	0.000000	0.638494	9.715913

Tabel 40: Oplegreacties als gevolg van de maximale jaarlijkse temperatuur

Verplaatsingscontouren van de brug voor de minimale temperatuur in een jaar zijn gegeven in figuren 54 en 55. Aangezien het hier om een minimale temperatuur gaat, welke kleiner is dan de initiële temperatuur T_0 , hebben we te maken met een verkorting van de constructie. De opleggingen bij steunpunt 3 en 4 verplaatsen naar het vaste punt toe, oftewel de richting van de verplaatsing in langsrichting is negatief.



Figuur 54: Vooraanzicht verplaatsingscontour voor de minimale jaarlijkse temperatuur

De verplaatsing in langsrichting van de opleggingen bij steunpunt 4 (rechter landhoofd), zijn ongeveer gelijk aan:

 $Dx = \epsilon \cdot L = \alpha \cdot \Delta T_{N,exp} \cdot L = (1 \cdot 10^{-5} \cdot -27) \cdot 271.45 \cdot 10^{3} = -27 \cdot 10^{-5} \cdot 271.45 \cdot 10^{3} = -73.2915 \text{mm}$

Deze waarde is nagenoeg gelijk aan de verplaatsing die met Midas CIVIL wordt gevonden (zie tabel 41 of de legenda van figuur 54, waarde voor de rode kleur is 73.60097mm).



Figuur 55: Dwarsdoorsnede steunpunt 3 verplaatsingscontour voor de minimale jaarlijkse temperatuur

De verplaatsingen, rotaties en oplegreacties die de opleggingen te verwerken krijgen als gevolg van de minimale jaarlijkse temperatuur zijn gegeven in tabel 41 en 42.

Oplegging	Dx (mm)	Dy (mm)	Dz (mm)	Rx (rad)	Ry (rad)	Rz (rad)
w1a	23.214879	-1.750382	0.000000	0.000072	0.000101	-0.000007
w1b	23.225185	0.000000	0.000000	-0.000071	0.000103	0.000011
w2a	0.000000	-1.487252	0.000000	-0.000038	0.000003	0.000001
w2b	0.000000	0.000000	0.000000	0.000037	0.000004	0.000000
w3a	-49.820090	-1.492673	0.000000	-0.000045	-0.000005	-0.000001
w3b	-49.825914	0.000000	0.000000	0.000045	-0.000005	-0.000001
w4a	-73.031846	-1.750501	0.000000	0.000074	-0.000101	0.000009
w4b	-73.039399	0.000000	0.000000	-0.000073	-0.000103	-0.000012

Tabel 41: Verplaatsingen en rotaties als gevolg van de minimale jaarlijkse tempe	eratuur
---	---------

Oplegging	Fx (kN)	Fy (kN)	Fz (kN)
w1a	0.000000	0.000000	5.165466
w1b	0.000000	-2.499002	-11.772868
w2a	47.547210	0.000000	-8.612708
w2b	-47.597919	1.881936	14.979341
w3a	0.000000	0.000000	-7.656686
w3b	0.000000	1.411862	15.019708
w4a	0.000000	0.000000	4.801860
w4b	0.000000	-0.783337	-11.924103

Tabel 42: Oplegreacties als gevolg van de minimale jaarlijkse temperatuur

De voorgaande twee situaties die zijn beschouwd leverden allebei uiterste verplaatsingen op. Het verschil tussen de verplaatsingen die optreden bij een maximale en minimale jaarlijkse temperatuur is de slijtweg van een oplegging voor een wrijvingsloze situatie (tabel 43).

Oplegging	Dx Tmax	Dx Tmin	Slijtweg Dx	Dy Tmax	Dy Tmin	Slijtweg Dy
	(mm)	(mm)	(mm)	(mm)	(mm)	(mm)
w1a	-18.915827	23.214879	84.261412	1.426237	-1.750382	6.353238
w1b	-18.924225	23.225185	84.298820	0.000000	0.000000	0.000000
w2a	0.000000	0.000000	0.000000	1.211835	-1.487252	5.398174
w2b	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000
w3a	40.594148	-49.820090	180.828476	1.216252	-1.492673	5.417850
w3b	40.598893	-49.825914	180.849614	0.000000	0.000000	0.000000
w4a	59.507430	-73.031846	265.078552	1.426334	-1.750501	6.353670
w4b	59.513584	-73.039399	265.105966	0.000000	0.000000	0.000000

Tabel 43: Slijtweg door jaarlijkse temperatuurwisseling (voor opleggingen zonder wrijving)

Zonder af te vragen of de wrijving wel of niet overwonnen wordt en of de verplaatsingen wel of niet optreden, kan gesteld worden dat de slijtwegen Dy in dwarsrichting (tabel 43) verwaarloosbaar klein zijn. Hoewel de waarden voor de dwarsrichting aanzienlijk groter zijn, kan ook gesteld worden dat deze slijtwegen op jaarbasis geen significante bijdrage leveren aan de totale afgelegde weg.

Waar de verplaatsing door jaarlijkse temperatuurwisselingen wel invloed op heeft, is de plaats waar de glijvlakken van een glijoplegging onderling contact maken. Gedurende een jaar kan de onderlinge positie van de glijvlakken voor een oplegging van bijvoorbeeld steunpunt 4 zo'n 13cm verschillen. Een mogelijk gevolg is ongelijkmatige slijtage van het PTFE materiaal in de glijoplegging.

Het ligt voor de hand om te veronderstellen dat, ondanks dat er wrijving in de opleggingen aanwezig is, de verplaatsingen die vermeld zijn in tabel 39 daadwerkelijk op zullen treden. Wanneer de opleggingen door wrijving alle verplaatsingen door de maximale jaarlijkse temperatuur tegen zouden kunnen gaan, zal de brug gaan krommen zoals afgebeeld in figuur 54. Hierbij treedt in het midden van de hoofdoverspanning een verplaatsing van 95.94mm op en worden enorme dwangkrachten veroorzaakt (tabel 44).

Oplegging	Wrijvings-	Dwangkracht voor Tmax		Dwangkrac	nt voor Tmin
	kracht (kN)	Fx (kN)	Fy (kN)	Fx (kN)	Fy (kN)
w1a	68	36474.886109	-14674.369695	-44764.632953	18009.453729
w1b	68	36486.596578	14681.937739	-44779.004953	-18018.741775
w2a	1113	6286.484109	-21644.344144	-7715.230496	26563.513268
w2b	-	6531.437546	21645.062494	-8015.855165	-26564.394879
w3a	1063	-7416.513465	-21442.917646	9102.084707	26316.308018
w3b	1108	-8041.263396	21406.001259	9868.823260	-26271.001544
w4a	79	-35271.584859	-13956.494586	43287.854188	17128.425172
w4b	77	-35050.042266	13985.124610	43015.961000	-17163.562029

 Tabel 44: Dwangkrachten als gevolg van de maximale jaarlijkse temperatuur

In tabel is tevens de wrijvingskracht gegeven die door een oplegging opgenomen kan worden (zie paragraaf 9.3 hoe deze waarden bepaald zijn). De enorm grote dwangkrachten veroorzaakt door de jaarlijkse temperatuur wisseling wanneer de opleggingen niet zouden kunnen verplaatsen, zijn vele malen groter dan de wrijvingskrachten die de opleggingen daadwerkelijk kunnen opnemen. Dit betekent dat de kromming van figuur 56 niet plaats zal vinden en dat de verplaatsingen die vermeld zijn in tabel 39 wel optreden.



Figuur 56: Kromming door de maximale temperatuur in een jaar, voor een brugconstructie met opleggingen zonder translatievrijheid

11.3. Dagelijkse temperatuurwisseling

Alleen de uiterste waarden op een dag zullen worden beschouwd, wat in rekening wordt gebracht door middel van de temperatuurverschilcomponenten ΔT voor afkoeling en opwarming (paragraaf 6.2). De waarde van ΔT voor dagelijkse temperatuurwisseling verloopt lineair over de hoogte van de doorsnede (figuur 57).



Figuur 57: Uiterste dagelijkse temperatuurverschillen (links opwarming en rechts afkoeling)

De posities waar de waarden van ΔT_1 en ΔT_2 bekend zijn, bevinden zich altijd op de constante afstand h_1 en h_2 vanaf de bovenzijde van de doorsnede, ongeacht de variabele doorsnede hoogte. Het verwarmen van de constructie beperkt zich tot de eerste 0.4m vanaf de bovenzijde van de bovenflens voor opwarmen en 0.25m voor afkoelen. Dit betekent dat alleen een gedeelte van de bovenflens zal opwarmen en afkoelen. Er worden geen temperatuurverschillen in rekening gebracht voor de wanden en de onderflens.

Zoals beschreven in bijlage L wordt een temperatuurverschil toegewezen aan een knoop, door middel van een 'nodal temperature'. Om het lineaire verloop in rekening te kunnen brengen is het noodzakelijk de bovenflens in meer elementen op te delen (bijlage L4 t/m L6). Voor opwarming en afkoeling zullen daarom twee afzonderlijke modellen worden gebruikt, met verschillende opdeling van de bovenflens.

Bij opwarming moet de opdeling van de bovenflens zo zijn dat de hoogte van de bovenste twee elementen in de flens overeenkomen met de waarden van h1 en h2. In figuur 58 is te zien hoe de opdeling eruit ziet en welke temperatuurverschillen in rekening zijn gebracht. Deze temperatuurverschillen verlopen lineair binnen de hoogte van de elementen. In alle overige knopen is geen temperatuurverschil aanwezig.



Figuur 58: Opdeling van de bovenflens en toegewezen knoop temperaturen voor de maximale dagelijkse temperatuur

In figuur 59 is het verplaatsingencontour gegeven, veroorzaakt door de maximale dagelijkse temperatuur. Doordat het temperatuurverschil niet gelijkmatig is over de hoogte van de doorsnede en het middenveld en de eindvelden verschillen in stijfheid, zal de constructie krom trekken. Aangezien we te maken hebben met een hogere temperatuur aan de bovenzijde van de constructie, wordt de bovenflens bol en zijn de verplaatsingen in langsrichting positief.



Figuur 59: 3D aanzicht verplaatsingencontour voor de maximale dagelijkse temperatuur

De verplaatsingen, rotaties en oplegreacties die voor deze maximale dagelijkse temperatuur worden gevonden zijn in tabel 45 en tabel 46 opgesomd.

Oplegging	Dx (mm)	Dy (mm)	Dz (mm)	Rx (rad)	Ry (rad)	Rz (rad)
w1a	0.219578	-0.040050	0.000000	-0.000023	-0.000222	0.000001
w1b	0.221641	0.000000	0.000000	0.000023	-0.000222	-0.000000
w2a	0.000000	-0.002800	0.000000	-0.000001	0.000118	-0.000000
w2b	0.000000	0.000000	0.000000	0.000001	0.000118	0.000000
w3a	4.063137	-0.002618	0.000000	-0.000001	-0.000119	0.000001
w3b	4.066234	0.000000	0.000000	0.000001	-0.000119	0.000001
w4a	3.856295	-0.039685	0.000000	-0.000023	0.000229	-0.000002
w4b	3.845199	0.000000	0.000000	0.000023	0.000229	-0.000001

 Tabel 45: Verplaatsingen en rotaties als gevolg van de maximale dagelijkse temperatuur

De oplegreacties in horizontale richting zijn zo klein dat ze verwaarloosd kunnen worden. Ook de verticale oplegreacties zijn te verwaarlozen, aangezien ze maar een klein percentage zijn van de verticale oplegreacties die worden veroorzaakt door het eigen gewicht van de constructie.

Oplegging	Fx (kN)	Fy (kN)	Fz (kN)
w1a	0.00000	0.00000	50.181439
w1b	0.000000	-0.731962	50.089634
w2a	0.792047	0.00000	-51.735095
w2b	-0.785905	1.635770	-48.026013
w3a	0.000000	0.000000	-48.906873
w3b	0.00000	-2.154538	-52.964489
w4a	0.00000	0.00000	50.923672
w4b	0.000000	1.250883	50.437730

 Tabel 46: Oplegreacties als gevolg van de maximale dagelijkse temperatuur

Bij afkoeling moet de opdeling van de bovenflens zo zijn dat de hoogte van het bovenste element in de flens overeenkomt met de waarde van h1 (figuur 57). Op de bovenste knopen van de bovenflens is het temperatuurverschil van -3.8°C aangebracht. Dit temperatuurverschil verloopt lineair binnen de hoogte van het element. In alle overige knopen is geen temperatuurverschil aanwezig.



Figuur 60: Opdeling van de bovenflens en toegewezen knoop temperaturen voor de minimale dagelijkse temperatuur

In figuur 61 is het verplaatsingencontour gegeven, veroorzaakt door de minimale dagelijkse temperatuur. Doordat het temperatuurverschil niet gelijkmatig is over de hoogte van de doorsnede, zal de constructie krom trekken.



Figuur 61: 3D aanzicht verplaatsingencontour voor de minimale dagelijkse temperatuur

temperatuur worden gevonden zijn in tabel 47 en tabel 48 opgesomd.OpleggingDx (mm)Dy (mm)Dz (mm)Rx (rad)Ry (rad)Rz (rad)w1a-0.1162750.0219610.0000000.0000120.000115-0.00000

De verplaatsingen, rotaties en oplegreacties die voor deze minimale dagelijkse

CPICEBILE					ity (raa)	112 (100)
w1a	-0.116275	0.021961	0.000000	0.000012	0.000115	-0.000000
w1b	-0.117558	0.000000	0.000000	-0.000012	0.000115	0.000000
w2a	0.000000	-0.001727	0.000000	-0.000001	-0.000061	0.000000
w2b	0.000000	0.000000	0.000000	0.000001	-0.000061	-0.000000
w3a	-2.082168	-0.001918	0.000000	-0.000002	0.000061	-0.000000
w3b	-2.083907	0.000000	0.000000	0.000002	0.000061	-0.000000
w4a	-1.971290	0.021434	0.000000	0.000012	-0.000119	0.000001
w4b	-1.964739	0.000000	0.000000	-0.000012	-0.000119	0.000001

Tabel 47: Verplaatsingen en rotaties als gevolg van de minimale dagelijkse temperatuur

Oplegging	Fx (kN)	Fy (kN)	Fz (kN)
w1a	0.00000	0.000000	-26.122475
w1b	0.00000	0.476923	-26.239087
w2a	-0.989454	0.000000	27.023540
w2b	0.987614	-0.994656	24.990663
w3a	0.00000	0.000000	25.606166
w3b	0.00000	1.211129	27.845418
w4a	0.00000	0.000000	-26.705004
w4b	0.00000	-0.693127	-26.399222

 Tabel 48: Oplegreacties als gevolg van de minimale dagelijkse temperatuur

De voorgaande twee situaties die zijn beschouwd leverden allebei uiterste verplaatsingen op. Het verschil tussen de verplaatsingen die optreden bij een maximale en minimale dagelijkse temperatuur is de slijtweg van een oplegging voor een wrijvingsloze situatie op een dag (tabel 49).

Oplegging	Dx Tmax (mm)	Dx Tmin (mm)	Slijtweg Dx (mm)	Dy Tmax (mm)	Dy Tmin (mm)	Slijtweg Dy (mm)
w1a	0.219578	-0.116275	0.671706	-0.040050	0.021961	0.124022
w1b	0.221641	-0.117558	0.678398	0.000000	0.000000	0.000000
w2a	0.000000	0.000000	0.000000	-0.002800	-0.001727	0.002146
w2b	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000
w3a	4.063137	-2.082168	12.29061	-0.002618	-0.001918	0.001400
w3b	4.066234	-2.083907	12.30028	0.000000	0.000000	0.000000
w4a	3.856295	-1.971290	11.65517	-0.039685	0.021434	0.122238
w4b	3.845199	-1.964739	11.61988	0.000000	0.000000	0.000000

Tabel 49: Slijtweg door dagelijkse temperatuurwisseling (voor opleggingen zonder wrijving)

Het vermenigvuldigen van de dagelijkse slijtwegen met het aantal dagen in een jaar en het aantal levensjaren van een oplegging, geeft de slijtwegen van de opleggingen gedurende een jaar en gedurende de levensduur (tabel 50). Dit zijn de slijtwegen als gevolg van de dagelijkse temperatuurwisseling voor opleggingen waarin geen wrijving aanwezig is. Voor de levensduur van de opleggingen wordt 25 jaar als uitgangspunt genomen. 11. Gedrag van opleggingen als gevolg van thermische belasting

Onlogging	Slijtweg Dx			Slijtweg Dy		
Oplegging	1 Dag (mm)	1 Jaar (mm)	25 jaar (m)	1 Dag (mm)	1 Jaar (mm)	25 jaar (m)
w1a	0.671706	245.17269	6.129317	0.124022	45.26803	1.131701
w1b	0.678398	247.61527	6.190382	0.000000	0.000000	0.000000
w2a	0.000000	0.000000	0.000000	0.002146	0.783290	0.019582
w2b	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000
w3a	12.29061	4486.07265	112.1518	0.001400	0.511000	0.012775
w3b	12.30028	4489.60220	112.2401	0.000000	0.000000	0.000000
w4a	11.65517	4254.13705	106.3534	0.122238	44.61687	1.115422
w4b	11.61988	4241.25620	106.0314	0.000000	0.000000	0.000000

Tabel 50: Slijtweg door dagelijkse temperatuurwisseling (voor opleggingen zonder wrijving) over een termijn van 1 dag, 1 jaar en 25 jaar

De verplaatsingen en daarmee ook de slijtwegen in dwarsrichting (y richting) die ontstaan als gevolg van de dagelijkse temperatuurwisseling zijn verwaarloosbaar klein. Over 25 jaar, de aangenomen levensduur van de opleggingen, treedt slechts een slijtweg van 1.1317m op in bolsegment oplegging w1a. De verplaatsingen en slijtwegen in langsrichting (x richting) zijn ook gering, maar zeker niet verwaarloosbaar. In de potopleggingen van steunpunt 3 en de bolsegment opleggingen van steunpunt 4 treden de grootste slijtwegen van respectievelijk 112m en 106m op. Deze waarden gelden voor opleggingen waarin geen wrijving aanwezig is.

Wanneer de opleggingen door wrijving alle verplaatsingen door de dagelijkse temperatuurwisseling tegen zouden kunnen gaan, worden dwangkrachten veroorzaakt zoals vermeld in tabel 51. Voor de opleggingen van steunpunt 1 en 4 zijn deze dwangkrachten al groot genoeg om de wrijving te overwinnen. De dwangkrachten bij steunpunt 2 en 3 zijn net niet groot genoeg om de wrijving te overwinnen. Echter, het dagelijks verkeer op de brug zal zorgen dat de wrijving ook daar overwonnen wordt.

Oplogging	Wrijvings-	Dwangkrach	it voor Tmax	Dwangkracht voor Tmin	
Opiegging	kracht (kN)	Fx (kN)	Fy (kN)	Fx (kN)	Fy (kN)
w1a	68	1409.769756	271.399584	-718.263031	-151.890447
w1b	68	1408.759752	-271.658652	-717.811352	152.053562
w2a	1113	1199.424188	105.647895	-617.677811	3.357694
w2b	-	1208.427388	-104.632083	-622.503729	-3.939531
w3a	1063	-1178.649499	99.351394	606.583571	7.566301
w3b	1108	-1255.837826	-100.671891	648.822968	-6.875301
w4a	79	-1435.849474	278.624784	732.579640	-152.671511
w4b	77	-1356.044282	-278.061034	688.269738	152.399232

Tabel 51: Dwangkrachten als gevolg van de dagelijkse temperatuurwisseling

Geconcludeerd kan worden dat verplaatsingen in dwarsrichting als gevolg van dagelijkse temperatuurwisseling verwaarloosbaar klein zijn of zelfs niet op zullen treden doordat de wrijving in de opleggingen niet zal worden overwonnen. Verplaatsingen in langsrichting zullen wel plaats vinden en gelijk zijn aan de waarden die vermeld zijn in tabel 45 en tabel 47. Tot nog toe zijn alleen verplaatsingen beschouwd in langs- en dwarsrichting, die gerelateerd zijn aan horizontale vlakke glijvlakken. Zoals te zien in figuur 59 en 61 zorgen de (theoretische) maximale en minimale dagelijkse temperatuur ook voor kromming van de brugconstructie en dus voor rotaties ter hoogte van de steunpunten. Deze rotaties Φ zullen verplaatsingen u in het gekromde vlak van de bolsegment opleggingen veroorzaken (figuur 62).



Figuur 62: Verplaatsing in gekromd vlak van een bolsegment oplegging

De rotaties om de y-as (as in dwarsrichting) zijn in onderstaande tabel gegeven voor de opleggingen van steunpunt 1 en 4, aangezien dit bolsegment opleggingen zijn. Het betreft rotaties als gevolg van de maximale en minimale temperatuur op een dag.

Oplegging	Rotatie Φ_y als gevolg van de maximale dagelijkse temperatuur (rad)	Rotatie $\Phi_{ m y}$ als gevolg van de minimale dagelijkse temperatuur (rad)
w1a	-0.000222	0.000115
w1b	-0.000222	0.000115
w4a	0.000229	-0.000119
w4b	0.000229	-0.000119

Tabel 52: Rotaties om de y-as als gevolg van dagelijkse temperatuurwisseling

De slijtwegen die deze rotaties veroorzaken zijn in onderstaande tabel vermeld. Het betreft een bovengrens, aangezien er geen wrijving in rekening is gebracht.

Oplegging	Slijtweg gedurende 1 dag (m)	Slijtweg gedurende 25 jaar (m)
w1a	0.000674	6.15
w1b	0.000674	6.15
w4a	0.000696	6.35
w4b	0.000696	6.35

Tabel 53: Bovengrens van de slijtwegen in gekromde vlakken van de bolsegment opleggingen

De slijtweg voor oplegging w1a volgt uit:

$$s_{w1a} = 2 \cdot (\varphi_{y,Tmax} \cdot R) + 2 \cdot (\varphi_{y,Tmin} \cdot R) = 2 \cdot (0.000222 \cdot 1) + 2 \cdot (0.000115 \cdot 1) = 6.74 \cdot 10^{-4} \, \text{m}$$

11.4. Invloed van de slijtlaag dikte

Op de Dintelhavenbrug is een slijtlaag aanwezig van 140mm, waardoor de dagelijkse temperatuurverandering in de betonconstructie niet erg groot zal zijn. Zoals verwacht zijn de verplaatsingen als gevolg van de dagelijkse temperatuurwisseling daarom ook niet groot. Het is niet onwaarschijnlijk dat op andere vergelijkbare betonnen bruggen in Nederland een dunnere slijtlaag is aangebracht, of dat de slijtlaag in de loop der jaren door slijtage dunner is geworden. Daarom zal worden onderzocht welke invloed een dunnere slijtlaag heeft op de verplaatsingen die door dagelijkse temperatuurwisseling optreden.

In paragraaf 11.3 zijn de verplaatsingen door dagelijkse temperatuurwisseling bepaald, voor temperatuurveranderingen die gerelateerd zijn aan een slijtlaag van 140mm. Met behulp van lineaire extrapolatie waren deze temperatuurveranderingen vastgesteld in paragraaf 6.2 (zie tabel 16). Met behulp van lineaire interpolatie kan deze tabel verder worden uitgebreid, zodat de temperatuurverschillen voor tussenliggende slijtlagen bekend zijn. Hiermee zijn de waarden verkregen, zoals vermeld in onderstaande tabel. De waarde van ΔT_2 is gesteld op 0 voor slijtlagen met een dikte groter dan 100mm, aangezien voor deze waarden geen lineair verband aanwezig is. De waarden voor de hoogten h_1 en h_2 waarover het lineair verloop van de temperatuurverschillen plaats vindt blijven gelijk.

Dikto von de	Dikto von de	Temperatuurverschil						
Dikte van de	sliitlaag		Opwarming	3		Afkoeling		
ριαατ (Π)	Siljtiaag	ΔT_1	ΔT_2	ΔT_3	ΔT_1	ΔT_2	ΔT_3	ΔT_4
m	mm	°C	°C	°C	°C	°C	°C	°C
	Zonder slijtlaag	20	9.5	0	-8	-1.0	0	0
Variabel (>1.5m)	50	15	7	0	-6.5	-1.0	0	0
	100	10	4.5	0	-5	-0.5	0	0
Variabel (>1.5m)	110	9	4	0	-4.7	0	0	0
	120	8	3.5	0	-4.4	0	0	0
	130	7	3	0	-4.1	0	0	0
	140	6	2.5	0	-3.8	0	0	0

 Tabel 54: Dagelijkse temperatuurverschillen voor verschillende slijtlaag dikten

De verplaatsingen als gevolg van dagelijkse temperatuurwisseling voor de slijtlaag dikten van 110, 120 en 130mm zijn op vergelijkbare wijze bepaald zoals in de vorige paragraaf is beschreven voor een slijtlaag van 140mm. In de volgende twee tabellen zijn de resultaten voor de hiervoor genoemde slijtlaag dikten opgesomd. Alleen de verplaatsingen in langsrichting zijn gegeven, aangezien de verplaatsingen in dwarsrichting verwaarloosbaar klein bleken te zijn.

	Verplaatsing Dx op 1 dag als gevolg van de maximale dagelijkse temperatuur (mm)						
Oplegging	Slijtlaag	Slijtlaag	Slijtlaag	Slijtlaag			
	110mm	120mm	130mm	140mm			
w1a	0.338296	0.298724	0.259151	0.219578			
w1b	0.341458	0.301519	0.261580	0.221641			
w2a	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000			
w2b	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000			
w3a	6.301213	5.555188	4.809163	4.063137			
w3b	6.306011	5.559418	4.812826	4.066234			
w4a	5.983123	5.274180	4.565238	3.856295			
w4b	5.965996	5.259063	4.552131	3.845199			

Tabel 55: Verplaatsingen in langsrichting als gevolg van de maximale dagelijkse temperatuur

	Verplaatsing Dx op 1 dag als gevolg van de minimale dagelijkse temperatuur (mm)						
Oplegging	Slijtlaag	Slijtlaag	Slijtlaag	Slijtlaag			
	110mm	120mm	130mm	140mm			
w1a	-0.143813	-0.134634	-0.125454	-0.116275			
w1b	-0.145400	-0.136119	-0.126838	-0.117558			
w2a	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000			
w2b	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000			
w3a	-2.575313	-2.410932	-2.246550	-2.082168			
w3b	-2.577464	-2.412945	-2.248426	-2.083907			
w4a	-2.438175	-2.282547	-2.126918	-1.971290			
w4b	-2.430072	-2.274961	-2.119850	-1.964739			

Tabel 56: Verplaatsingen in langsrichting als gevolg van de minimale dagelijkse temperatuur

De slijtwegen die voor de verschillende slijtlaag dikten optreden gedurende 1 jaar, zijn in onderstaande tabel gegeven. Op jaarbasis kan een slijtlaag die 30mm dunner is, er voor zorgen dat er 2m meer verplaatsing op zal treden bij de opleggingen van steunpunt 3 en steunpunt 4.

	Slijtweg in 1 jaar als gevolg van de dagelijkse temperatuurwisseling (mm)						
Oplegging	Slijtlaag	Slijtlaag	Slijtlaag	Slijtlaag			
	110mm	120mm	130mm	140mm			
w1a	351.93957	316.35134	280.76165	245.17269			
w1b	355.40634	319.47574	283.54514	247.61527			
w2a	0	0	0	0			
w2b	0	0	0	0			
w3a	6479.86398	5815.2676	5150.67049	4486.07265			
w3b	6484.93675	5819.82499	5154.71396	4489.60293			
w4a	6147.54754	5516.41071	4885.27388	4254.13705			
w4b	6129.12964	5499.83752	4870.54613	4241.25474			

 Tabel 57: Slijtwegen in 1 jaar als gevolg van de dagelijkse temperatuurwisseling

Omgerekend naar een levensduur voor opleggingen van 25 jaar, betekent een dunnere slijtlaag een toename van de slijtweg van ongeveer 50m voor de opleggingen van w3a en w3b. De slijtwegen die voor de verschillende slijtlaag dikten optreden over een periode van 25 jaar, zijn in tabel 58 gegeven.

11. Gedrag van opleggingen als gevolg van thermische belasting

	Slijtweg in 25 jaar als gevolg van de dagelijkse temperatuurwisseling (m)						
Oplegging	Slijtlaag	Slijtlaag	Slijtlaag	Slijtlaag			
	110mm	120mm	130mm	140mm			
w1a	8.79848925	7.9087835	7.01904125	6.12931725			
w1b	8.88515850	7.9868935	7.08862850	6.19038175			
w2a	0	0	0	0			
w2b	0	0	0	0			
w3a	161.9965995	145.3816900	128.7667623	112.1518163			
w3b	162.1234188	145.4956248	128.8678490	112.2400733			
w4a	153.6886885	137.9102678	122.1318470	106.3534263			
w4b	153.2282410	137.4959380	121.7636533	106.0313685			

Tabel 58: Slijtwegen in 25 jaar als gevolg van de dagelijkse temperatuurwisseling

Ook de slijtwegen in de gekromde vlakken van de bolsegment opleggingen nemen toe. De slijtwegen over een periode van 25 jaar zijn in onderstaande tabel gegeven, voor slijtlagen van 110mm en 140mm dik. De toename is zeer gering en de slijtwegen in de gekromde vlakken die de dagelijkse temperatuurwisselingen met zich meebrengen zijn erg klein.

Oplegging	Slijtweg gedurende 25 jaar, voor een slijtlaag van 110mm (m)	Slijtweg gedurende 25 jaar, voor een slijtlaag van 140mm (m)
w1a	8.89	6.15
w1b	8.89	6.15
w4a	9.16	6.35
w4b	9.16	6.35

Tabel 59: Slijtwegen in gekromde vlakken in 25 jaar als gevolg van de dagelijksetemperatuurwisseling

Tot slot kan nog wat gezegd worden over de maximale glijweg die door de dagelijkse temperatuurwisseling wordt veroorzaakt. Voor een slijtlaag dikte van 110mm zijn de jaarlijkse slijtwegen berekend. Voor oplegging w3b bedraagt deze slijtweg die gedurende een jaar optreedt zo'n 6485mm. Terug gerekend komt dit neer op een slijtweg van 17.77mm op 1 dag. De maximale glijweg zal voor deze oplegging dan ongeveer gelijk zijn aan 8.9mm.
12. CONCLUSIES EN AANBEVELINGEN

12.1. Conclusies

Uit de analyse van de statische verkeersbelasting en thermische belastingen zijn resultaten verkregen voor reactiekrachten, verplaatsingen, rotaties, snelheden en slijtwegen die bij de verschillende opleggingen optreden. Om een oordeel te kunnen geven over de waarden die in de tests van NEN1337 zijn opgenomen, worden de resultaten en de tests met elkaar vergeleken. Het mag duidelijk zijn dat uit dit onderzoek niet voor alle parameters die in de tests van NEN1337 opgenomen zijn, een waarde is gevonden om ter vergelijking te dienen.

Waarden die met elkaar vergeleken kunnen worden, zijn in onderstaande tabellen opgenomen. Tabel 60 en 61 bevat waarden die gerelateerd zijn aan de tests voor glijopleggingen, die beschreven zijn in NEN-EN 1337-2. De gegevens in de eerste tabel met betrekking tot type B zijn kenmerkend voor een situatie waarbij we te maken hebben met verkeersbelasting. De temperatuur wordt daarbij als constant beschouwd, terwijl de snelheid bij benadering sinusvormig verloopt. De gegevens in tabel 61 met betrekking tot type A zijn kenmerkend voor een situatie waarbij we te maken hebben met thermische belasting. De snelheid wordt daarbij als constant beschouwd, terwijl verschillende waarden voor de temperatuur in rekening worden gebracht.

Type B (fase 2, 4, 6), variabele snelheid (bij benadering sinusvormig)			
Greathaid	Waarde die volgt uit		
diootheid	NEN-EN 1337-2	Model Dintelhavenbrug	
Contactdruk hoofd oplegging oppervlakken (N/mm ²)	29.7	19.54	
Glijafstand (mm)	8	5.9	
Gemiddelde glijsnelheid (mm/s)	2	0.214 tot 0.370	
Totale slijtweg voor PTFE platen die vlak en gesmeerd zijn, 10 fasen (m)	10000	9827.73 (in 1 jaar)	
Totale slijtweg voor glijmaterialen voor geleidingen en gekromde vlakken, 2 fasen (m)	2000	1582 (in 1 jaar)	

Tabel 60: Vergelijking van waarden uit de tests van NEN-EN 1337-2 voor glijopleggingen, gerelateerd aan verkeersbelastingen

Type A (fase 1, 3, 5 Temperatuur – programma – test), constante snelheid			
Creathald	Waarde die volgt uit		
Grootheid	NEN-EN 1337-2	Model Dintelhavenbrug	
Contactdruk hoofd oplegging oppervlakken (N/mm ²)	29.7	19.54	
Glijafstand (mm)	10	8.9	
Glijsnelheid (mm/s)	0.4	-	
Totale slijtweg voor PTFE platen die vlak en gesmeerd zijn, 11 fasen (m)	242	162 (in 25 jaar)	
Totale slijtweg voor glijmaterialen voor geleidingen en gekromde vlakken, 3 fasen (m)	66	9.16 (in 25 jaar)	

Tabel 61: Vergelijking van waarden uit de tests van NEN-EN 1337-2 voor glijopleggingen,gerelateerd aan thermische belastingen

Tabel 62 en 63 bevatten waarden die gerelateerd zijn aan de tests voor potopleggingen, die beschreven zijn in NEN-EN 1337-5. De eerste tabel heeft betrekking op de het dwangmoment in een potoplegging, terwijl in de tweede tabel de waarden voor de lange termijn test zijn vermeld (long term rotation and load test).

Bepalen van factoren voor het dwangmoment			
	Waarde die volgt uit		
Grootheid		Model	
	NEN-EN 1337-5	Dintelhavenbrug	
Contactspanning (N/mm ²)	35	19.54	
Sinusvormige beweging via de hefboomsarm, voor het simuleren van α_2 , veroorzaakt door veranderlijke belasting (rad)	±0.01	-	
Voor de sinusvormige beweging zijn tenminste vijf cycli zijn vereist met een bepaalde frequentie f (Hz)	0.003 ≤ f < 0.006	-	

Tabel 62: Vergelijking van waarden uit de tests van NEN-EN 1337-5 voor potopleggingen,gerelateerd aan het dwangmoment

'Long term rotation and load test' uitgevoerd bij kamertemperatuur (+10 $^{\circ}$ C < T < +30 $^{\circ}$ C)			
	Waarde die volgt uit		
Grootheid		Model	
	NEN-EN 1337-5	Dintelhavenbrug	
Contactspanning tijdens de rotatieprocedure (N/mm ²)	35	19.54	
Sinusvormig aanbrengen van een rotatiehoek door middel van	+0.0025	0 00028	
beweging van de hefboomsarm (rad)	10.0025	0.00028	
Voor de sinusvormige beweging geldt een frequentie f (Hz)	0.25 < f < 2.5	0.091	
De test wordt uitgevoerd totdat een zekere slijtweg is bereikt,			
afhankelijk van het materiaal van de afdichtring (m); de waarden	500	-	
in de kolom hiernaast gelden voor achtereenvolgens een	1000	863.17 (in 1 jaar)	
roestvrijstalen, bronzen en polyoxymethylene of koolstof	2000	-	
gevulde PTFE afdichtring			
Contactspanning in de elastomeer waarbij de piston in			
geroteerde toestand is geplaatst, om te testen of de elastomeer	60	-	
niet uit de pot gedrukt wordt (N/mm²)			

Tabel 63: Vergelijking van waarden uit de tests van NEN-EN 1337-5 voor potopleggingen, gerelateerd aan rotaties en belastingen die de oplegging te verwerken krijgt op lange termijn

In het algemeen lijken de waarden die bepaald zijn met behulp van het eindige elementen model van de Dintelhavenbrug qua orde grootte goed overeen te komen met de waarden die opgenomen zijn in de tests van NEN-EN 1337.

De uitzonderingen hierin zijn de waarden voor:

- snelheid waarmee verplaatsingen in langsrichting optreden als gevolg van verkeersbelasting op de brug
- slijtweg in gekromde vlakken als gevolg van de dagelijkse temperatuurwisseling
- frequenties van de rotatiebewegingen in potopleggingen, veroorzaakt door veranderlijke belasting

Een ander belangrijk punt van aandacht zijn de horizontale krachten die de opleggingen te verwerken krijgen. Wanneer in de opleggingen geen wrijving bevatten is gebleken dat de horizontale krachten slechts enkele kN bedragen (bijlage H1). Bij het in rekening brengen van wrijving kunnen daarentegen enorme dwangkrachten ontstaan. Aangezien het niet is gelukt om de wrijving naar wens in het eindige elementen model op te nemen en de speling tussen de sparing in het deksel en de geleiding verwaarloosd is, zijn er geen uitspraken te doen over het verloop van de horizontale krachten. Dit betekent dat er ook geen beeld is verkregen op welk moment een geleiding aanligt.

Tot slot dient nog te worden opgemerkt dat in de voorschriften niet is vermeld of slijtwegen (tabel 60 en 61) overeenkomen met een tijdsduur van 1 jaar of de levensduur van de oplegging, wat gelijk is aan zo'n 10 tot 25jaar. Enerzijds wordt vermeld dat verondersteld kan worden dat een oplegging die de test doorstaat, in de praktijk gedurende zijn levensduur kan functioneren. Anderzijds kan het zo zijn dat een oplegging getest wordt op de slijtweg die hij gedurende 1 jaar te verwerken krijgt en dat op basis daarvan wordt verondersteld dat de oplegging gedurende zijn levensduur kan functioneren. Dit heeft als voordeel dat een oplegging op een niet al te grote slijtweg getest hoeft te worden en dat de tijdsduur van een test daarmee beperkt blijft.

De veronderstelling dat de waarden van 10000m voor de slijtweg van PTFE platen die vlak en gesmeerd zijn representatief is voor 1 jaar, wordt kracht bijgezet door het feit dat uit het model van de Dintelhavenbrug een vergelijkbare waarde volgt. Tevens heeft de opleggingen fabrikant Maurer Söhne opleggingen geproduceerd voor de Tejo Bridge in Lissabon, waarbij het MSM[®] bolsegment opleggingen voor een slijtweg van 10km/jaar betrof [5].

12.2. Aanbevelingen

Uit dit onderzoek is gebleken dat een groot aantal waarden die in de tests zijn voorgeschreven, overeenkomen met de waarden die volgen uit het eindige elementen model van de Dintelhavenbrug. Statische analyses van de verkeersbelasting en thermische belasting bleek hiervoor voldoende te zijn. Verder studie naar deze parameters is dan ook niet noodzakelijk.

Echter, voor de snelheden waarmee verplaatsingen in langsrichting optreden, de slijtweg in gekromde vlakken door dagelijkse temperatuurwisseling en de frequenties van rotatiebewegingen door veranderlijke belasting, zijn afwijkende waarden vastgesteld. Indien het gewenst is verder onderzoek te doen naar deze parameters, wordt aangeraden gebruik te maken van dynamische analyses. Met behulp van de dynamische analyses kunnen tevens dynamische vergrotingsfactoren worden vastgesteld en wrijving in de opleggingen in rekening wordt gebracht. Dat geeft de mogelijkheid om verder onderzoek te doen naar de horizontale krachten op de opleggingen en het wel of niet aanliggen van de geleidingen. In dit rapport is aangetoond dat het vaststellen van betrouwbare waarden van de dynamische vergrotingsfactor en het in rekening brengen van de wrijving in opleggingen complex is en een uitgebreide studie vereist.

Een ander aspect op basis waarvan dit onderzoek een vervolg kan hebben is de simulatie van het dagelijkse verkeer. In dit rapport is aangetoond dat de volgafstanden en het aantal vrachtwagens op de brug een grote invloed heeft op de verplaatsingen in opleggingen. Op basis van de afzonderlijke vrachtwagens en de vrachtwagen interactie is een bovengrens en ondergrens voor de slijtwegen vastgesteld. In de praktijk zal zich een situatie voordoen dat zich tussen deze twee grenzen bevindt. Door middel van een verkeerssimulatie kan naar deze praktijk situatie toegewerkt worden.

Naast simulatie geeft uiteraard, indien geschikte apparatuur en voldoende geld beschikbaar zijn, het uitvoeren van metingen aan brugopleggingen inzicht in krachten, verplaatsingen en rotaties. Een meting aan de Dintelhavenbrug is daarom zeker aan te bevelen.

Het modelleren van andere typen betonnen bruggen, is ook zeker aan te raden. Voor een ander brugtype in combinatie met belastingen, zal waarschijnlijk een andere belasting- en bewegingsgeschiedenis gelden.

BIJLAGEN

A. GEOMETRIE DINTELHAVENBRUG	103
 A1. Bovenaanzicht en langsdoorsnede A2. Variabele waarden doorsnede afmetingen A3. Hamerstuk steunpunt 2 A4. Doorsneden hamerstuk steunpunt 3 A5. Doorsneden aanzetstukken bij landhoofden 	103 104 106 108 110
B. FRICTION PENDULUM SYSTEM TYPE ISOLATOR	111
 B1. FPS ISOLATOR IN MIDAS CIVIL B2. LIGGERMODEL B3. 1D LIGGERMODEL ANALYTISCH B4. 1D LIGGERMODEL MIDAS CIVIL B5. 3D LIGGERMODEL ANALYTISCH B6. 3D LIGGERMODEL MIDAS CIVIL 	111 112 113 114 115 118
C. RESULTATEN ALP MODEL EN TESTMODEL	122
C1. INVOER EN RESULTATEN ALP MODEL C2. RESULTATEN MIDAS CIVIL TESTMODEL	122 126
D. MESH VERFIJNING	128
D1. Mesh verfijning in y richting D2. Mesh verfijning in z richting	128 129
E. MODAL ANALYSIS	130
E1. Eigenmodes E2. Eigenfrequenties E3. Massaparticipaties	130 132 134
F. INVLOEDSLIJNEN EENHEIDSASLAST	136
F1. REACTIEKRACHTEN F2. VERPLAATSINGEN F3. ROTATIES	136 137 139
G. VRACHTWAGENDATA VANUIT DATA EENHEIDSASLAST	141
G1. VIRTUELE VRACHTWAGEN	141
H. INVLOEDSLIJNEN VRACHTWAGENTYPEN	143
H1. REACTIEKRACHTEN H2. VERPLAATSINGEN H3. ROTATIES H4. SNELHEDEN	143 150 155 167

I. DWANGKRACHTEN VEROORZAAKT DOOR EENHEIDSASLAST	172
I1. KRACHTEN IN LANGSRICHTING (X RICHTING)I2. KRACHTEN IN DWARSRICHTING (Y RICHTING)	172 173
J. VRACHTWAGEN INTERACTIE	174
J1. Volgafstand vrachtwagens J2. Aantal vrachtwagens	174 176
K. DYNAMISCH VS. STATISCH	179
K1. VERPLAATSING IN LANGSRICHTING K2. Oplegreactie	179 180
L. THERMISCHE INVLOEDEN	181
L1. LIGGERMODEL 1 L2. LIGGERMODEL 1 ANALYTISCH L3. LIGGERMODEL 1 MIDAS CIVIL L4. LIGGERMODEL 2 L5. LIGGERMODEL 2 ANALYTISCH	181 181 183 186 186
L6. LIGGERMODEL 2 MIDAS CIVIL	187

A. GEOMETRIE DINTELHAVENBRUG

A1. Bovenaanzicht en langsdoorsnede



A2. Variabele waarden doorsnede afmetingen

Snede	x (m)	h	d	b1	b2
landhoofd / aanzetstuk zuid	0	3000	Detail	600	600
aanzetstuk zuid / sluitstuk - 2 - zuid	3,5	3009	331	600	600
sluitstuk - 2 - zuid / moot 2 - zuid - 15	8,5	3053	333	600	600
moot 2 - zuid - 15 / moot 2 - zuid - 14	13,5	3134	339	600	600
moot 2 - zuid - 14 / moot 2 - zuid - 13	18,5	3252	346	600	600
moot 2 - zuid - 13 / moot 2 - zuid - 12	23,5	3406	356	600	600
moot 2 - zuid - 12 / moot 2 - zuid - 11	28,5	3597	368	600	600
moot 2 - zuid - 11 / moot 2 - zuid - 10	33,5	3825	383	600	600
moot 2 - zuid - 10 / moot 2 - zuid - 09	38,5	4090	399	600	600
moot 2 - zuid - 09 / moot 2 - zuid - 08	43,5	4391	419	600	600
moot 2 - zuid - 08 / moot 2 - zuid - 07	48,5	4729	440	600	600
moot 2 - zuid - 07 / moot 2 - zuid - 06	53,5	5104	464	600	600
moot 2 - zuid - 06 / moot 2 - zuid - 05	58,5	5516	490	600	600
moot 2 - zuid - 05 / moot 2 - zuid - 04	63,5	5964	519	600	600
moot 2 - zuid - 04 / moot 2 - zuid - 03	67,5	6349	543	600	600
moot 2 - zuid - 03 / moot 2 - zuid - 02	71,5	6758	569	600	600
moot 2 - zuid - 02 / moot 2 - zuid - 01	75,5	7190	597	600	600
moot 2 - zuid - 01 / hamerstuk 2	79,5	7646	626	600	600
as hamerstuk 2	86,5	8500	Detail	600	600
hamerstuk 2 / moot 2 - noord - 01	95,475	7484	535	600	600
moot 2 - noord - 01 / moot 2 - noord - 02	99,475	7065	509	600	600
moot 2 - noord - 02 / moot 2 - noord - 03	103,475	6666	483	600	600
moot 2 - noord - 03 / moot 2 - noord - 04	107,475	6288	459	600	600
moot 2 - noord - 04 / moot 2 - noord - 05	111,475	5930	437	600	600
moot 2 - noord - 05 / moot 2 - noord - 06	116,475	5512	410	600	600
moot 2 - noord - 06 / moot 2 - noord - 07	121,475	5126	385	600	600
moot 2 - noord - 07 / moot 2 - noord - 08	126,475	4773	363	600	600
moot 2 - noord - 08 / moot 2 - noord - 09	131,475	4451	342	600	600
moot 2 - noord - 09 / moot 2 - noord - 10	136,475	4162	324	600	600
moot 2 - noord - 10 / moot 2 - noord - 11	141,475	3904	308	600	600
moot 2 - noord - 11 / moot 2 - noord - 12	146,475	3679	293	600	600
moot 2 - noord - 12 / moot 2 - noord - 13	151,475	3486	281	600	600
moot 2 - noord - 13 / moot 2 - noord - 14	156,475	3326	271	600	600
moot 2 - noord - 14 / moot 2 - noord - 15	161,475	3197	263	600	600
moot 2 - noord - 15 / moot 2 - noord - 16	166,475	3101	256	600	600
moot 2 - noord - 16 / moot 2 - noord - 17	171,475	3036	252	600	600
moot 2 - noord - 17 / sluitstuk midden	176,475	3004	250	600	600
as sluitstuk midden	178,975	3000	250	600	600
sluitstuk midden / moot 3 - zuid - 17	181,475	3004	250	600	600
moot 3 - zuid - 17 / moot 3 - zuid - 16	186,475	3036	252	600	600
moot 3 - zuid - 16 / moot 3 - zuid - 15	191,475	3101	256	600	600
moot 3 - zuid - 15 / moot 3 - zuid - 14	196,475	3197	263	600	600
moot 3 - zuid - 14 / moot 3 - zuid - 13	201,475	3326	271	600	600
moot 3 - zuid - 13 / moot 3 - zuid - 12	206,475	3486	281	600	600
moot 3 - zuid - 12 / moot 3 - zuid - 11	211,475	3679	293	600	600
moot 3 - zuid - 11 / moot 3 - zuid - 10	216,475	3904	308	600	600
moot 3 - zuid - 10 / moot 3 - zuid - 09	221,475	4162	324	600	600
moot 3 - zuid - 09 / moot 3 - zuid - 08	226,475	4451	342	600	600

moot 3 - zuid - 08 / moot 3 - zuid - 07	231,475	4773	363	600	600
moot 3 - zuid - 07 / moot 3 - zuid - 06	236,475	5126	385	600	600
moot 3 - zuid - 06 / moot 3 - zuid - 05	241,475	5512	410	600	600
moot 3 - zuid - 05 / moot 3 - zuid - 04	246,475	5930	437	600	600
moot 3 - zuid - 04 / moot 3 - zuid - 03	250,475	6288	459	600	600
moot 3 - zuid - 03 / moot 3 - zuid - 02	254,475	6666	483	600	600
moot 3 - zuid - 02 / moot 3 - zuid - 01	258,475	7065	509	600	600
moot 3 - zuid - 01 / hamerstuk 3	262,475	7484	535	600	600
as hamerstuk 3	271,45	8500	Detail	600	600
hamerstuk 3 / moot 3 - noord - 01	278,45	7646	576	639	673
moot 3 - noord - 01 / moot 3 - noord - 02	282,45	7190	547	661	697
moot 3 - noord - 02 / moot 3 - noord - 03	286,45	6758	519	684	729
moot 3 - noord - 03 / moot 3 - noord - 04	290,45	6349	493	706	769
moot 3 - noord - 04 / moot 3 - noord - 05	294,45	5964	469	728	818
moot 3 - noord - 05 / moot 3 - noord - 06	299,45	5516	440	756	889
moot 3 - noord - 06 / moot 3 - noord - 07	304,45	5104	414	785	973
moot 3 - noord - 07 / moot 3 - noord - 08	309,45	4729	390	819	1069
moot 3 - noord - 08 / moot 3 - noord - 09	314,45	4391	369	863	1178
moot 3 - noord - 09 / moot 3 - noord - 10	319,45	4090	349	919	1299
moot 3 - noord - 10 / moot 3 - noord - 11	324,45	3825	333	992	1421
moot 3 - noord - 11 / moot 3 - noord - 12	329,45	3597	318	1087	1543
moot 3 - noord - 12 / moot 3 - noord - 13	334,45	3406	306	1207	1665
moot 3 - noord - 13 / moot 3 - noord - 14	339,45	3552	296	1357	1787
moot 3 - noord - 14 / moot 3 - noord - 15	344,45	3134	289	1540	1909
moot 3 - noord - 15 / sluitstuk 3 noord	349,45	3053	283	1762	2031
sluitstuk 3 noord / aanzetstuk noord	354,45	3009	281	2024	2154
aanzetstuk noord / landhoofd	357,95	3000	280	2331	2273

De x coördinaat van de snede correspondeert met een assenstelsel waarvan de oorsprong gelegen is ter hoogte van steunpunt 1 (links van aanzetstuk zuid).



A3. Hamerstuk steunpunt 2



Figuur 63: Langsdoorsnede hamerstuk 2



Figuur 64: Aanzicht A hamerstuk 2



Figuur 65: Doorsnede B hamerstuk 2



Figuur 66: Doorsnede C hamerstuk 2



A4. Doorsneden hamerstuk steunpunt 3





Figuur 68: Aanzicht A hamerstuk 3



Figuur 69: Doorsnede B hamerstuk 3



Figuur 70: Doorsnede C hamerstuk 3





Figuur 71: Langsdoorsnede aanzetstuk steunpunt 1



Figuur 72: Langsdoorsnede aanzetstuk steunpunt 4

B. FRICTION PENDULUM SYSTEM TYPE ISOLATOR

B1. FPS Isolator in Midas CIVIL

In Midas CIVIL zijn de eigenschappen van de FPS Isolator opgedeeld in een lineair en niet lineair aandeel en is onderscheid gemaakt in parameters voor axiale, afschuif- en rotatievervormingen. Hier zullen alleen de parameters voor axiale vervorming en afschuifvervorming worden beschouwd, aangezien de FPS Isolator toegepast zal worden voor opleggingen met horizontale glijvlakken. Het toepassen van de FPS Isolator voor wrijving in een gekromd vlak van een bolsegment oplegging, zal buiten beschouwing worden gelaten.

Parameters voor zowel axiale als afschuifvervorming (lineair):

- k_{eff} = effectieve stijfheid
- c = effectieve demping

Parameters voor axiale vervorming (niet lineair):

- f = axiale kracht
- d = verplaatsing
- k = veerstijfheid
- o = opening

De parameters voor axiale vervorming zijn aan elkaar gerelateerd zoals gegeven in het schema van figuur 73.



Figuur 73: Schema voor axiale vervorming FPS Isolator

Parameters voor afschuifvervorming (niet lineair):

- f = afschuifkracht
- P = normaalkracht
- d = verplaatsing
- k = aanvang veerstijfheid voor afschuiven voorafgaande aan glijden
- μ_s = wrijvingscoëfficiënt voor langzame vervorming snelheid
- μ_f = wrijvingscoëfficiënt voor snelle vervorming snelheid
- r = mate voor verandering van de wrijvingscoëfficiënt met betrekking tot de snelheid van vervormen
- R = straal voor het glijoppervlak
- α = parameter voor het bepalen van het verloop van de hysteretic kromme
- β = parameter voor het bepalen van het verloop van de hysteretic kromme

Parameters voor afschuifvervorming zijn aan elkaar gerelateerd zoals gegeven in het schema van figuur 74.



Figuur 74: Schema voor afschuifvervorming FPS Isolator

In het eindige elementen model kan een 'general link' element worden opgenomen, waaraan de eigenschappen van de FPS Isolator zijn toegewezen. Om inzicht te krijgen in de werking van de FPS Isolator is een 'general link' element toegepast in een eenvoudig 1D en 3D liggermodel. De resultaten van deze eenvoudige modellen en een bijbehorende analytische berekening zijn toegelicht in het vervolg van deze bijlage.

B2. Liggermodel

Om te onderzoeken of het Friction Pendulum System element gewenste resultaten geeft als modellering van wrijving tussen twee glijvlakken, wordt gebruik gemaakt van een eenvoudig liggermodel (figuur 75). Last P₁ beweegt van het linker naar het rechter steunpunt. Op het rechter steunpunt is een constante last P₂ aanwezig, die representatief is voor een constante normaalkracht op de oplegging als gevolg van het eigen gewicht van de constructie.



Figuur 75: Liggermodel

Waarden voor de parameters:

$P_1 = 1000$	[kN]	beweegbare last
$P_2 = 10000$	[kN]	constante last ter simulatie van eigen gewicht
a = variabel	[m]	afstand linker steunpunt tot beweegbare last
b = variabel	[m]	afstand rechter steunpunt tot beweegbare last
L = 20	[m]	lengte ligger
A = 1	[m ²]	doorsnede oppervlak
I = 0.0833333	[m ⁴]	traagheidsmoment
e = 0.5	[m]	excentriciteit steunpunt t.o.v. neutrale lijn

B3. 1D liggermodel analytisch

Wanneer in het rechter steunpunt wrijving aanwezig is, zal een horizontale wrijvingskracht (dwangkracht) opgebouwd kunnen worden. Deze dwangkracht wordt veroorzaakt door de beweegbare last P_1 die van het linker steunpunt naar het rechter steunpunt beweegt. De formule voor deze dwangkracht kan worden bepaald op basis van vergeetmenietjes.

Vergeetmenietje 1: rotaties veroorzaakt door beweegbare last P1



Vergeetmenietje 2: rotaties veroorzaakt door moment



Met de voorgaande vergeetmenietjes kan de verplaatsing worden bepaald, die het rechter steunpunt ondergaat. De totale verplaatsing volgt uit een aandeel ten gevolge van de beweegbare last P_1 (figuur 76) en een aandeel ten gevolge van een moment M die veroorzaakt wordt door de horizontale oplegreactie (figuur 77).



Figuur 76: Verplaatsing rechter steunpunt door beweegbare puntlast



Figuur 77: Verplaatsing rechter steunpunt door moment

De dwangkracht die opgebouwd wordt bij een situatie waarbij wel wrijving aanwezig is, volgt uit de stijfheid van de ligger en de verplaatsing die zou optreden bij een wrijvingsloze situatie. Het invullen van de vergeetmenietjes voor de verplaatsing:

$$F = \frac{EA}{L} (u_{1} + u_{2} + u_{3} + u_{4})$$

$$= \frac{EA \cdot e}{L} \left[\frac{P_{1}ab(L + a)}{6L \cdot EI} - \frac{FeL}{2EI} + \frac{P_{1}ab(L + b)}{6L \cdot EI} - \frac{FeL}{2EI} \right]$$

$$= A \cdot e \left[\frac{P_{1}ab(L + a) + P_{1}ab(L + b)}{6L^{2} \cdot I} - \frac{Fe}{I} \right]$$

$$= \frac{P_{1}ab(L + a) + P_{1}ab(L + b)}{6L^{2} \cdot I} A \cdot e - F \frac{Ae^{2}}{I}$$

$$F \cdot \left(1 + \frac{Ae^{2}}{I} \right) = \frac{P_{1}ab(L + a) + P_{1}ab(L + b)}{6L^{2} \cdot I} A \cdot e$$

$$F = \frac{P_{1}ab(L + a) + P_{1}ab(L + b)}{6L^{2} \cdot I} \cdot \frac{A \cdot e}{I + \frac{Ae^{2}}{I}}$$

Aan de hand van de formule voor de dwangkracht, kan per positie van de beweegbare last P_1 de bijbehorende waarde van de dwangkracht worden bepaald.

B4. 1D liggermodel Midas CIVIL

Ter controle van de formule voor de dwangkracht, is een eenvoudig 1D liggermodel gemaakt. Bij dit model is gebruik gemaakt van de situatie en parameters, zoals beschreven in paragraaf B1 van deze bijlage. Voor beide steunpunten is geen verplaatsing mogelijk, alleen rotatie om de y as is toegestaan, zodat doorbuiging van de ligger in verticale richting mogelijk is. De beweegbare last is op 11 posities op de ligger geplaatst en per positie zijn de bijbehorende oplegreacties opgevraagd (tabel 64). De oplegreacties Fx die in onderstaande tabel staan vermeld, zijn opgevraagd in het rechter steunpunt.

Last positie	Fx	Fy	Fz
positie 1	0.000000	0.000000	0.000000
positie 2	-1350.000000	0.000000	100.000000
positie 3	-2400.000000	0.000000	200.000000
positie 4	-3150.000000	0.000000	300.000000
positie 5	-3600.000000	0.000000	400.000000
positie 6	-3750.000000	0.000000	500.000000
positie 7	-3600.000000	0.000000	600.000000
positie 8	-3150.000000	0.000000	700.000000
positie 9	-2400.000000	0.000000	800.000000
positie 10	-1350.000000	0.000000	900.000000
positie 11	0.000000	0.000000	1000.000000

Tabel 64: Oplegreactie 1D liggermodel

De waarden va F_x blijken gelijk te zijn aan de waarden die volgen uit de analytische oplossing. Ter controle is hiervoor de waarde van F_x nagerekend, die volgt uit de positie van last 3 (waarvoor a = 4m en b =16m).

$$F = \frac{P_1 a b (L + a) + P_1 a b (L + b)}{6L^2 \cdot I} \cdot \frac{A \cdot e}{1 + \frac{Ae^2}{I}}$$

= $\frac{1000 \cdot 4 \cdot 16 \cdot (20 + 4) + 1000 \cdot 4 \cdot 16 \cdot (20 + 16)}{6 \cdot 20^2 \cdot 0.083333} \cdot \frac{1 \cdot 0.5}{1 + \frac{1 \cdot 0.5^2}{0.083333}} = 2400 \text{kN}$

B5. 3D liggermodel analytisch

Het 1D liggermodel kan worden vertaald naar een 3D liggermodel, zoals weergegeven in figuur 78. De ligger wordt nu ondersteund door vier opleggingen, waarvan de opleggingen 1 en 2 geen verplaatsing toestaan en de opleggingen 3 en 4 bij het rechter steunpunt afhankelijk van de wrijving wel verplaatsing toestaan.



Figuur 78: 3D liggermodel

De wrijving zorgt er tevens voor dat bij de opleggingen van dit rechter steunpunt een horizontale reactiekracht F_x aanwezig is. Voor oplegging 4 kan aan de hand van de dwangkracht en de wrijvingskracht worden bepaald welke reactiekracht in de oplegging optreedt.

Voor het analyseren van de richting van de krachten zijn er twee situaties te onderscheiden. Situatie 1 waarbij de beweegbare last beweegt van het linker steunpunt tot aan het midden van de overspanning (figuur 79) en situatie 2 waarbij de beweegbare last beweegt van het midden van de overspanning tot aan het rechter steunpunt (figuur 80). De overgang tussen deze twee situaties, dus als de last het midden van de overspanning passeert, zorgt voor een wisseling van toename van de doorbuiging naar afname van de doorbuiging. De krachten veranderen hierbij van teken.



Figuur 79: Situatie 1 waarbij de last P1 beweegt van het linker steunpunt tot aan het midden



Figuur 80: Situatie 2 waarbij de last P1 beweegt van het midden tot aan het rechter steunpunt

Voor de dwangkracht F_d geldt dat deze lineair toeneemt van 0 tot een maximale waarde, totdat de doorbuiging maximaal is en de last P_1 op het midden van de overspanning staat. Vanaf dat moment zal de doorbuiging gaan afnemen en wordt de dwangkracht opnieuw vanaf 0 opgebouwd tot een maximale waarde, maar nu in tegengestelde richting. Voor een ligger op twee steunpunten is de dwangkracht gelijk aan:

$$F_{d} = \frac{P_{1}ab(L+a) + P_{1}ab(L+b)}{6L^{2} \cdot I} \cdot \frac{A \cdot e}{1 + \frac{Ae^{2}}{L}}$$

Wrijvingskracht F_w die in oplegging 4 kan worden opgenomen, werkt in tegengestelde richting van de dwangkracht, waarbij:

 $F_{w} = \mu \cdot N_{totaal} = \mu \cdot (N_{P1} + N_{P2})$ $N_{P1} = variabele normaalkracht op oplegging 4 als gevolg van de beweegbare last P_1$ $N_{P2} = constante normaalkracht op oplegging 4 als gevolg van de constante last P_2$

Naast de hiervoor beschreven dwangkracht en wrijvingskracht treedt er als gevolg van het belasten van de ligger een elastisch vervorming op. Deze elastische vervorming zal bij de afname in doorbuiging overwonnen moeten worden in de vorm van een kracht F_{el} . De grootte van deze kracht is moeilijk vast te stellen. In de analytische berekening is er vanuit gegaan dat deze kracht gelijk is aan de wrijvingskracht die opgebouwd is tijdens het doorbuigingsproces. Deze aanname zorgt voor een realistisch verloop van de grafiek voor de oplegreactie F_x van oplegging 4.

De oplegreactie die bij oplegging 4 optreedt bij een toename in doorbuiging (situatie 1) volgt uit de volgende voorwaarden:

 $F_d < F_w$ dan treedt er geen verplaatsing op en is de oplegreactie gelijk aan F_d $F_d > F_w$ dan treedt er wel verplaatsing op en is de oplegreactie gelijk aan F_w

De oplegreactie die bij oplegging 4 optreedt bij een afname in doorbuiging (situatie 2) volgt uit de volgende voorwaarden:

 $F_d - F_{el} < F_w$ dan treedt er geen verplaatsing op en is de oplegreactie gelijk aan $F_d - F_{el}$ $F_d - F_{el} > F_w$ dan treedt er wel verplaatsing op en is de oplegreactie gelijk aan F_w

Op basis van deze voorwaarde is het verloop voor oplegreactie F_x gevonden (figuur 81).



Figuur 81: Oplegreactie Fx volgend uit 3D liggermodel analytisch

B6. 3D liggermodel Midas CIVIL

De reactiekracht F_x van steunpunt 4 is tevens bepaald met een 3D liggermodel in Midas CIVIL. De ligger is hierin opgebouwd uit 1280 volume elementen (0.25 x 0.25 x 0.25m³), en heeft wederom de eigenschappen zoals vermeld in bijlage B2 (figuur 75). De last P₁ beweegt wederom van het linker naar het rechter steunpunt en de last P₂/2 is aangebracht op de opleggingen van het rechter steunpunt. In dit model zijn twee general link elementen opgenomen, waaraan de eigenschappen van de Friction Pendulum System Isolator zijn toegewezen. Hiermee wordt de wrijving in de opleggingen van het rechter steunpunt.



Figuur 82: 3D liggermodel Midas CIVIL met general links

De parameters waarmee de eigenschappen van de FPS Isolator zijn gedefinieerd, zijn hieronder vermeld.

Parameters voor zowel axiale als afschuifvervorming (lineair):k_{eff} = 10000kN/meffectieve stijfheidc = 0kNs/meffectieve demping

Parameters voor axiale vervorming (niet lineair): $k = 1 \cdot 10^7 kN/m$ veerstijfheido = 0mopening

De parameters voor afschuifvervorming (niet lineair):

$k = 1 \cdot 10^{14} kN/m$	aanvang veerstijfheid voor afschuiven voorafgaande aan glijden
μs = 0.03	wrijvingscoëfficiënt voor langzame vervorming snelheid
μf = 0.03	wrijvingscoëfficiënt voor snelle vervorming snelheid
r = 0s/m	mate voor verandering van de wrijvingscoëfficiënt m.b.t. de snelheid van vervormen
R = 0m	straal voor het glijoppervlak

α = 0.5	parameter voor het bepalen van het verloop van
	de hysteretic kromme
β = 0.5	parameter voor het bepalen van het verloop van
	de hysteretic kromme

Voor de wrijvingscoëfficiënt is een realistische waarde van 3% aangenomen. Door de parameter r gelijk te stellen aan 0, is er geen onderscheid aanwezig in een wrijvingscoëfficiënt voor snelle en langzame vervorming. Het gelijkstellen van de straal R aan 0 representeert een oplegging met een horizontale oppervlak, zonder kromming. De waarde van 0.5 voor beide hysteretic loop parameters α en β is terug te vinden in verschillende literatuur over de hysteretic Bouc-Wen model [11]. Het verloop van de kracht-verplaatsing relatie (hysteretic behavior) wordt mede bepaald op basis van de hysteretic parameters α en β .

De parameters met betrekking tot stijfheid voor zowel de lineaire als niet-lineaire eigenschappen van de FPS Isolator, hebben de grootste invloed op de uiteindelijke resultaten voor krachten en verplaatsingen. De horizontale effectieve stijfheid is in feite willekeurig voor een niet lineaire time history analysis en dient als eerste aanname voor de aanvangsstijfheid. Een goede schatting heeft invloed op de convergentiesnelheid van het rekenproces [12].

Een laatste nog niet eerder genoemde parameter is de massa die toegewezen wordt aan de FPS Isolator. De massa wordt op iteratieve basis bepaald en moet klein zodat het dynamische effect verwaarloosbaar klein is, maar nog groot genoeg om de analyse te laten convergeren binnen een redelijke tijd [12]. In het voorgaande liggermodel is de massa van de FPS Isolator gesteld op 1kN.



Figuur 83: Oplegreactie Fx volgend uit 3D liggermodel Midas CIVIL

Van de voorgaande waarden voor de verschillende parameters van de FPS Isolator is gebruik gemaakt in het 3D liggermodel. Met dit model is de oplegreactie F_x bepaald voor oplegging 4. Opvallend is dat het verloop van de grafiek bij verschillende elasticiteitsmodulussen verschillen vertoond. De grafieken van oplegreactie F_x voor drie verschillende elasticiteitsmodulussen zijn gegeven in figuur 83.

Bij dezelfde oplegging treedt wanneer de wrijving is overwonnen ook verplaatsing op. De verplaatsing Ux van deze oplegging met wrijving is gegeven in figuur 84. Ter vergelijking is de verplaatsing Ux gegeven, die volgt uit een vergelijkbaar model zonder wrijving. Beide verplaatsinggrafieken zijn gegenereerd met een liggermodel, waarbij de elasticiteitsmodulus van de ligger gelijk is aan E=3.93e7kN/m².



Figuur 84: Verplaatsing Ux volgend uit 3D liggermodel Midas CIVIL (met en zonder wrijving)

In de voorgaande figuur is duidelijk te zien dat bij een wrijvingsloze situatie direct verplaatsing optreedt, terwijl bij de situatie met wrijving eerst een horizontale kracht opgebouwd moet worden om de wrijving te overwinnen. Bij de overgang van een toename in doorbuiging naar afname in doorbuiging, zullen de horizontale krachten in de oplegging wisselen van richting. Bij een oplegging met wrijving zal de wrijvingskracht opnieuw overwonnen moet worden. Dit is terug te zien in het vlakke deel aan de top van de grafiek voor de situatie met wrijving. Ook dan treedt er nauwelijks verplaatsing op, zolang de wrijving niet opnieuw is overwonnen. In dit traject zit tevens een stukje elastische vervorming verwerkt. In de test die in de Europese norm voorgeschreven zijn, is geen rekening gehouden met een dergelijk proces waarbij een aantal seconden geen verplaatsing optreedt (slip-stick gedrag). De duur van dit fenomeen zal wel invloed hebben op de snelheid waarmee de verplaatsing optreedt. Een laatste punt van aandacht is de maximale verplaatsing voor de situatie met wrijving en zonder wrijving. In de situatie met wrijving zal er ondanks dat er uiteindelijk verplaatsing optreedt een wrijvingskracht in de oplegging aanwezig zijn. Deze kracht zorgt voor het reduceren van de uiteindelijke maximale verplaatsing, in vergelijking met de wrijvingsloze situatie.

C. RESULTATEN ALP MODEL EN TESTMODEL

C1. Invoer en resultaten ALP model

Hieronder volgen zes tabellen waarin achtereenvolgens als invoer de geometrie, belasting en materiaaleigenschappen en als uitvoer de vormveranderingen (verplaatsing en rotatie), reactiekrachten en het eigen gewicht van het ALP model zijn gegeven.

Кпоор	Afstand tot	Traagheid	Oppervlak	Hoogte	Breedte
nummer	knoop 1 (m)	(m ⁴)	(m ²)	(m)	(m)
1.8		14,9812	11.3752	3,000	1,096
2	1,500	15.0030	11,3773	3.002	1.097
3	3.500	15.1001	11.3868	3.009	1.100
4	8.500	15.6909	11.4438	3.053	1.119
5	13.500	16.8098	11.5484	3.134	1.155
6	18.500	18.5215	11.7004	3.252	1.207
7	23.500	20.9225	11.8999	3.406	1.276
8	28.500	24.1440	12.1469	3.597	1.363
9	33.500	28.3559	12.4415	3.825	1.470
10	38.500	33.7701	12.7835	4.090	1.596
11	43.500	40.6460	13.1731	4.391	1.744
12	48.500	49.2952	13.6101	4.729	1.913
13	53.500	60.0875	14.0947	5.104	2.105
14	58.500	73.4565	14.6267	5.516	2.320
15	63.500	89.9062	15.2063	5.964	2.560
16	67.500	105.6722	15.7042	6.349	2.770
17	71.500	124.1169	16.2324	6.758	2.996
18	75.500	145.6137	16.7911	7.190	3.239
19	79.500	170.5764	17.3802	7.646	3.498
20	81.000	180.9226	17.6089	7.823	3.600
21 L	86.500	223.9986	18.4842	8.500	3.993
21 R		214.4550	17.8650	8.500	3.859
22	89.750	190.2523	17.3741	8.120	3.639
23	95.000	168.5655	16.9007	7.754	3.428
24	95.475	153.6004	16.5521	7.484	3.275
25	99.475	131.9950	16.0100	7.065	3.039
20	103.475	113.2004	15.4946	6.666	2.818
27	107.475	97.0000	15.0058	0.200	2.011
20	116 475	63.1373	14.0033	5.930	2.410
30	121 475	56 4740	13 50/5	5.126	1 008
31	126.475	46 6637	13 0473	4 773	1.820
32	131.475	38,7125	12,6316	4.451	1.661
33	136.475	32,3143	12.2575	4.162	1.522
34	141.475	27,2074	11,9250	3.904	1.402
35	146.475	23,1709	11.6341	3.679	1,299
36	151.475	20.0214	11.3847	3,486	1,212
37	156.475	17.6090	11.1768	3.326	1,142
38	161.475	15.8141	11.0106	3.197	1.087
39	166.475	14.5451	10.8859	3.101	1.046
40	171.475	13.7350	10.8028	3.036	1.019
41	176.475	13.3407	10.7612	3.004	1.006
42	178.975	13.2919	10.7560	3.000	1.004
43	181.475	13.3407	10.7612	3.004	1.006
44	186.475	13.7350	10.8028	3.036	1.019
45	191.475	14.5451	10.8859	3.101	1.046
46	196.475	15.8141	11.0106	3.197	1.087
47	201.475	17.6090	11.1768	3.326	1.142
48	206.475	20.0214	11.3847	3.486	1.212
49	211.475	23.1709	11.6341	3.679	1.299
50	216.475	27.2074	11.9250	3.904	1.402

51	221,475	32.3143	12.2575	4.162	1.522
52	226.475	38.7125	12.6316	4.451	1.661
53	231.475	46.6637	13.0473	4.773	1.820
54	236.475	56.4749	13.5045	5.126	1.998
55	241.475	68,5026	14,0033	5.512	2.198
56	246.475	83.1575	14.5436	5.930	2.418
57	250.475	97.0866	15.0058	6.288	2.611
58	254.475	113.2664	15.4946	6.666	2.818
59	258.475	131.9950	16.0100	7.065	3.039
60	262.475	153.6004	16.5521	7.484	3.275
61	264.950	168.5655	16.9007	7.754	3.428
62	268.200	190.2523	17.3741	8.120	3.639
63 L	271.450	214.4550	17.8650	8.500	3.859
63 R		218.1562	18.0972	8.500	3.910
64	276.950	175.7845	17.2219	7.823	3.519
65	278.450	165.6180	16.9932	7.646	3.417
66	282.450	141.1097	16.4041	7.190	3.159
67	286.450	120.0322	15.8454	6.758	2.918
68	290.450	102.2598	15.3612	6.349	2.686
69	294.450	86.9146	14.8838	5.964	2.474
70	299.450	70.9323	14.3353	5.516	2.232
71	304.450	57.9671	13.8404	5.104	2.015
72	309.450	47.5185	13.3991	4.729	1.820
73	314,450	39.1585	13.0114	4.391	1.649
74	319.450	32.5241	12.6773	4.090	1.500
75	324.450	27.3101	12.3968	3.825	1.371
76	329.450	23.2636	12.1699	3.597	1.262
77	334.450	20.1785	11.9966	3.406	1.172
78	339.450	17.8907	11.8769	3.252	1.100
79	344.450	16.2742	11.8108	3.134	1.044
80	349.450	15.2375	11.7983	3.053	1.005
81	354.450	14.7214	11.8394	3.009	.980
82	356.450	14.6533	11.8709	3.002	.974
83 L	357.950	14.6534	11.9001	3.000	.971

 Tabel 65:
 Doorsneden eigenschappen

Mootnummer	Lengte (m)	Mootnummer	Lengte (m)
1	1.500	43 T/M 55	5.000
2	2.000	56 T/M 59	4.000
3 T/M 14	5.000	60	2.475
15 T/M 18	4.000	61 T/M 62	3.250
19	1.500	63	5.500
20	5,500	64	1.500
21 T/M 22	3,250	65 T/M 68	4.000
23	2.475	69 T/M 80	5.000
24 T/M 27	4.000	81	2.000
28 T/M 40	5.000	82	1.500
41 T/M 42	2.500		

Tabel 66: Mootlengten

Belastinggeval A: Puntlast				
X coördinaat (m) Puntlast (kN)				
178_975 720				

Tabel 67: Belasting

Moten	Elasticiteitsmodulus (kN/m ²)	Volumegewicht (kN/m ³)
1 / 82	3.93E7	25.5

Tabel 68: Materiaaleigenschappen

Knoopnummer	Zakking	Hoekverdraaiing	Knoopnummer	Zakking	Hoekverdraaiing
	(mm)	(rad)		(mm)	(rad)
1	.00	- 000220	43	25 07	- 000056
2	33	- 000219	45	25 43	- 000156
3	77	000217	45	26.66	000237
4	-1.83	000205	46	23.09	000297
5	-2.80	000184	47	21.50	000338
6	-3.66	000156	48	19.74	000362
7	-4.36	000124	49	17.90	000373
8	-4.89	000088	50	16.04	000373
9	-5.24	000052	51	14.19	000365
10	-5.41	000016	52	12.39	000352
11	-5.40	.000018	53	10.67	000336
12	-5.23	.000049	54	9.04	000318
13	-4.91	.000078	55	7.49	000300
14	-4.46	.000104	56	6.04	000282
15	-3.88	.000127	57	4.94	-,000268
16	-3.33	.000144	58	3.89	000255
17	-2.73	.000159	59	2.90	000242
18	-2.07	.000172	60	1.95	000230
19	-1.36	.000184	61	1.39	000223
20	-1.08	.000188	62	.68	000214
21	.00	.000202	63	.00	000206
22	.67	.000211	64	-1.10	000192
23	1.37	.000220	65	-1.38	000188
24	1.92	.000227	66	-2.11	000175
25	2.85	.000239	67	-2.78	000162
26	3.83	.000252	68	-3.40	000147
27	4.87	.000265	69	-3.95	000130
28	5.96	.000280	70	-4.54	000106
29	7.40	.000298	71	-5.01	000080
30	8.94	.000317	72	-5.34	000051
31	10.57	.000335	73	-5.51	000018
32	12.29	.000352	74	-5.52	.000016
33	14.08	.000365	75	-5.34	.000053
34	15.93	.000373	76	-4.99	.000090
35	17.80	.000374	77	-4.45	.000126
36	19.65	.000364	78	-3.73	.000160
37	21.42	.000340	79	-2.86	.000188
38	23.03	.000300	80	-1.86	.000209
39	24.39	.000241	81	78	.000221
40	25.40	.000160	82	34	.000223
41	25.96	.000060	83	.00	.000224
42	26.03	.000002			

Tabel 69: Vormveranderingen

Knoopnummer	Reactiekracht (kN)
1	242.1
21	-604.0
63	-596.4
83	238.2

Tabel 70: Reactiekrachten

Moten	Volume (m ³)	Volumegewicht (kN/m ³)	Eigen gewicht (kN)
1 / 82	4799.274	25.50	122381.485

Tabel 71: Eigen gewicht

C2. Resultaten Midas CIVIL testmodel

Reactiekrachten en eigen gewicht

De onderstaande tabellen geven de reactiekrachten in de opleggingen weer voor vier puntlasten van 180kN (totaal 720kN) in het midden van de hoofdoverspanning, gevolgd door het eigen gewicht van de constructie. Uit de sommatie van de horizontale en verticale krachten blijkt dat er horizontaal en verticaal evenwicht is.

		FX	FY	FZ	FZ per steunpunt
Steunpunt	Кпоор	(kN)	(kN)	(kN)	(kN)
1	5252	0	0	-120.926098	-241.8294
	5249	0	0.089126	-120.903294	
2	3525	4.531532	0	302.701976	603.6328
	3524	-4.531532	-0.781488	300.930847	
3	4981	0	0	296.376433	596.1700
-	4979	0	1.793383	299.793519	
4	5340	0	0	-119.129131	-237.9734
	5337	0	-1.101021	-118.844253	
	Totaal	0	0	720	

Tabel 72: Reactiekrachten in de opleggingen ten gevolge van vier puntlasten van 180kN in het midden van de hoofdoverspanning (totaal 720kN).

		FX	FY	FZ
Steunpunt	Node	(kN)	(kN)	(kN)
1	5252	0	0	1203.352743
	5249	0	-1.309027	1220.428447
2	3525	143.407263	0	30932.962289
	3524	-143.407263	-16.362509	31024.779422
3	4981	0	0	30750.921974
	4979	0	47.580266	30735.874970
4	5340	0	0	1394.584975
	5337	0	-29.908730	1249.784906
	Totaal	0	0	128512.689726

Tabel 73: Reactiekrachten in de opleggingen ten gevolge van het eigen gewicht van de constructie.

Vormveranderingen

Op de volgende bladzijde is de verplaatsing geplot ten gevolge van de puntlast van 720kN in het midden van de hoofdoverspanning (aangebracht met vier puntlast van 180kN, symmetrisch geplaatst). De vervorming van de constructie ziet er realistisch uit en de maximale verplaatsing bedraagt 0.026422m.



Figuur 85: Verplaatsing van de constructie ten gevolge van een puntlast van 720kN in het midden van de hoofdoverspanning.



Figuur 86: Verplaatsingen van twee knopen ter hoogte van steunpunt 1

Met behulp van de verplaatsingen van de knopen en een de constructiehoogte van 3m ter hoogte van steunpunt 1, volgt uit de geometrie een rotatie van:

 $\phi = (dx_{node5221} - dx_{node5235}) / h_{constructie} = (1.5889788-0.9475453) / 3000 = -0.00021381 rad.$

D. MESH VERFIJNING

D1. Mesh verfijning in y richting





D2. Mesh verfijning in z richting

-0,00002

-0,00002



positie op de brug x (m)

E. MODAL ANALYSIS

E1. Eigenmodes







Figuur 88: Mode 2



Figuur 89: Mode 3



E2. Eigenfrequenties

Mode	Frequenties		Periode
No	(rad/sec)	(cycle/sec)	(sec)
1	3.128588	0.497930	2.008314
2	6.825419	1.086299	0.920557
3	7.115266	1.132430	0.883057
4	10.271500	1.634760	0.611711
5	13.319481	2.119861	0.471729
6	17.501475	2.785446	0.359009
7	17.715909	2.819574	0.354663
8	19.460120	3.097174	0.322875
9	20.408606	3.248131	0.307869
10	20.536716	3.268520	0.305949
11	24.828037	3.951505	0.253068
12	28.046211	4.463693	0.224030
13	31.533296	5.018680	0.199256
14	32.767466	5.215104	0.191751
15	36.106241	5.746487	0.174019
16	37.165354	5.915050	0.169060
17	40.505513	6.446653	0.155119
18	43.206664	6.876554	0.145422
19	44.096355	7.018153	0.142488
20	47.869312	7.618638	0.131257
21	50.014119	7.959994	0.125628
22	52.340498	8.330249	0.120044
23	55.400266	8.817226	0.113414
24	56.760683	9.033743	0.110696
25	58.673529	9.338182	0.107087
26	60.349748	9.604961	0.104113
27	61.722705	9.823474	0.101797
28	62.601665	9.963364	0.100368
29	62.875134	10.006888	0.099931
30	63.418372	10.093347	0.099075
31	64.198691	10.217539	0.097871
32	64.744638	10.304429	0.097046
33	65.149748	10.368904	0.096442
34	66.120085	10.523338	0.095027
35	66.762637	10.625604	0.094112
36	67.730614	10.779662	0.092767
37	69.146577	11.005020	0.090868
38	69.892853	11.123793	0.089897
39	70.676211	11.248468	0.088901
40	70.962596	11.294048	0.088542

 Tabel 74: Eigenfrequenties bepaald met een eigenwaarden analyse
Mode	Frequentie		Periode
No	(rad/sec)	(cycle/sec)	(sec)
1	3.128588	0.497930	2.008314
2	6.825419	1.086299	0.920557
3	7.115266	1.132430	0.883057
4	10.271500	1.634760	0.611711
5	13.319480	2.119861	0.471729
6	17.501475	2.785446	0.359009
7	17.715909	2.819574	0.354663
8	19.460120	3.097174	0.322875
9	20.408606	3.248130	0.307869
10	20.536716	3.268520	0.305949
11	24.828037	3.951505	0.253068
12	28.046211	4.463693	0.224030
13	31.533304	5.018681	0.199256
14	32.767466	5.215104	0.191751
15	36.106309	5.746498	0.174019
16	37.243042	5.927414	0.168708
17	40.692116	6.476351	0.154408
18	43.572180	6.934728	0.144202
19	44.096511	7.018178	0.142487
20	51.567972	8.207298	0.121843
21	52.342079	8.330501	0.120041
22	56.752707	9.032474	0.110712
23	59.045425	9.397371	0.106413
24	60.742013	9.667392	0.103441
25	64.291232	10.232267	0.097730
26	66.032534	10.509404	0.095153
27	67.730460	10.779638	0.092767
28	75.788762	12.062156	0.082904
29	79.607820	12.669978	0.078927
30	79.920544	12.719750	0.078618
31	88.509327	14.086697	0.070989
32	95.230326	15.156377	0.065979
33	112.988816	17.982729	0.055609
34	119.196447	18.970704	0.052713
35	131.290015	20.895455	0.047857
36	150.208179	23.906374	0.041830
37	205.862565	32.764045	0.030521
38	216.340191	34.431611	0.029043
39	245.074416	39.004805	0.025638
40	299.029141	47.591966	0.021012

 Tabel 75: Eigenfrequenties bepaald met een Ritz analyse

E3. Massaparticipaties

Mode	TRAN-X		TRAN-Y		TRAN-Z	
No	MASS(%)	SUM(%)	MASS(%)	SUM(%)	MASS(%)	SUM(%)
1	3.36	3.36	0	0	12.91	12.91
2	6.46	9.83	0.01	0.01	0.07	12.98
3	0	9.83	25.98	25.99	0	12.98
4	2.74	12.57	0	25.99	31.9	44.88
5	0.66	13.22	0	25.99	0.01	44.89
6	0	13.23	5.36	31.35	0	44.89
7	36.39	49.62	0	31.35	8.2	53.1
8	0	49.62	30.94	62.29	0	53.1
9	0.16	49.78	2.93	65.23	0.08	53.17
10	18.53	68.31	0.01	65.24	11.65	64.83
11	0	68.31	7.05	72.29	0	64.83
12	0.05	68.36	0	72.29	0.1	64.93
13	0	68.36	4.6	76.89	0	64.93
14	0.32	68.67	0.01	76.9	0.44	65.37
15	0.09	68.76	0	76.9	0	65.37
16	0	68.76	0.11	77.01	0	65.37
17	0	68.76	1.31	78.32	0	65.37
18	0	68.76	2.49	80.81	0	65.37
19	0.89	69.65	0	80.81	3.71	69.08
20	0	69.65	0.34	81.15	0	69.08
21	0	69.65	0.25	81.41	0	69.09
22	11.15	80.8	0	81.41	0.13	69.21
23	0.05	80.86	0.77	82.17	0.07	69.28
24	2.09	82.95	0.05	82.23	3.29	72.58
25	0.06	83.01	0.17	82.4	0.04	72.61
26	2.47	85.48	0.01	82.41	0.02	72.64
27	0.05	85.53	0.09	82.49	0.01	72.64
28	0.01	85.53	0.28	82.78	0.27	72.92
29	0.01	85.54	0	82.78	0	72.92
30	0.66	86.2	0.05	82.83	0.11	73.03
31	1.38	87.58	0	82.83	0.84	73.87
32	0.03	87.61	0.02	82.85	0	73.88
33	0.04	87.65	0.01	82.87	0.07	73.95
34	0.13	87.78	0	82.87	0.06	74
35	3.64	91.41	0	82.87	2.43	76.43
36	0.03	91.45	0.26	83.13	0.02	76.45
37	0.08	91.53	0	83.13	0.06	76.52
38	0.08	91.6	0	83.13	0.44	76.96
39	0	91.6	0.1	83.23	0.09	77.05
40	0	91.6	0.09	83.33	0.03	77.07

 Tabel 76: Massaparticipaties bepaald met een eigenwaarden analyse

Mode	TRAN-X		TRAN-Y		TRAN-Z	
No	MASS(%)	SUM(%)	MASS(%)	SUM(%)	MASS(%)	SUM(%)
1	3.36	3.36	0	0	12.91	12.91
2	6.46	9.83	0.01	0.01	0.07	12.98
3	0	9.83	25.98	25.99	0	12.98
4	2.74	12.57	0	25.99	31.9	44.88
5	0.66	13.22	0	25.99	0.01	44.89
6	0	13.23	5.36	31.35	0	44.89
7	36.39	49.62	0	31.35	8.2	53.1
8	0	49.62	30.94	62.29	0	53.1
9	0.16	49.78	2.93	65.23	0.08	53.17
10	18.53	68.31	0.01	65.24	11.65	64.83
11	0	68.31	7.05	72.29	0	64.83
12	0.05	68.36	0	72.29	0.1	64.93
13	0	68.36	4.6	76.89	0	64.93
14	0.32	68.67	0.01	76.9	0.44	65.37
15	0.09	68.76	0	76.9	0	65.37
16	0	68.76	0.12	77.02	0	65.37
17	0	68.76	1.55	78.57	0	65.37
18	0	68.76	2.42	80.98	0	65.37
19	0.89	69.65	0	80.98	3.71	69.08
20	0	69.66	0.79	81.78	0	69.09
21	11.16	80.81	0	81.78	0.13	69.22
22	2.15	82.96	0.01	81.79	3.41	72.63
23	0.32	83.29	0.9	82.69	0.01	72.64
24	2.64	85.93	0.15	82.84	0.12	72.76
25	0.18	86.11	0	82.84	0.09	72.84
26	5.41	91.52	0.01	82.85	3.05	75.89
27	0.03	91.55	0.22	83.07	1.71	77.61
28	0.19	91.73	1.79	84.86	0.43	78.03
29	0.06	91.8	0.59	85.45	0.03	78.06
30	0.12	91.91	0.11	85.56	3.8	81.86
31	0.81	92.72	0.11	85.67	0.09	81.95
32	0.59	93.31	0	85.67	0.03	81.98
33	0.16	93.47	5.7	91.38	0.1	82.08
34	0.71	94.18	0.3	91.67	5.46	87.54
35	2.31	96.49	0.15	91.83	1.71	89.24
36	0.09	96.58	0.02	91.84	0.03	89.27
37	1.56	98.14	2.49	94.33	0.53	89.81
38	0.67	98.81	3.97	98.3	0.38	90.19
39	0.31	99.12	0.08	98.39	4.97	95.16
40	0.01	99.13	0.04	98.43	0.42	95.58

Fabel 77: Massaparticipaties	bepaald met e	en Ritz analyse
-------------------------------------	---------------	-----------------

F. INVLOEDSLIJNEN EENHEIDSASLAST

F1. Reactiekrachten







F2. Verplaatsingen







F3. Rotaties







G. VRACHTWAGENDATA VANUIT DATA EENHEIDSASLAST

G1. Virtuele vrachtwagen

Vanuit de grafieken voor de vrijheidsgraden als gevolg van een eenheidsaslast, is het mogelijk om na een verschuiving over de asafastand, vermenigvuldiging met de aslast en een sommatie van de individuele assen de resultaten voor verplaatsingen, rotaties en oplegreacties te verkrijgen voor de verschillende vrachtwagentypen.

Als voorbeeld van dit principe is hier gebruik gemaakt van een virtuele vrachtwagen met 3 assen, aslasten van 100kN en asafstanden van 15m. De verticale oplegreactie die oplegging w1a te verwerken krijgt als gevolg van deze virtuele vrachtwagen, volgt uit de verticale oplegreactie Fz van oplegging w1a als gevolg van de eenheidsaslast (figuur 93).



Figuur 93: Oplegreactie Fz van oplegging w1a als gevolg van de eenheidsaslast

Deze lijn wordt voor iedere as met de bijbehorende aslast vermenigvuldigd, in dit geval dus 100kN voor iedere as (zie blauwe, rode en paarse lijn in figuur 94).

Door de individuele asaandelen over een verschuiving van de asafstand te sommeren, wordt de invloedslijn voor de virtuele vrachtwagen verkregen (groene lijn figuur 94). Op vergelijkbare wijze zijn de invloedslijnen verkregen voor de reactiekrachten, verplaatsingen en rotaties als gevolg van vrachtwagentypen.



Figuur 94: Principe voor het verkrijgen van de invloedslijnen van vrachtwagentypen

H. INVLOEDSLIJNEN VRACHTWAGENTYPEN

H1. Reactiekrachten





























H2. Verplaatsingen



tijd (s)

-2

















H3. Rotaties

















































H4. Snelheden




















171

I. DWANGKRACHTEN VEROORZAAKT DOOR EENHEIDSASLAST



I1. Krachten in langsrichting (x richting)





I2. Krachten in dwarsrichting (y richting)

J. VRACHTWAGEN INTERACTIE

J1. Volgafstand vrachtwagens

In hoofdstuk 9 is onderzoek gedaan naar de invloed van de volgafstand tussen twee vrachtwagens van het type V11-75%. Daarbij is begonnen met een constante volgafstand van 30m, welke vervolgens steeds met 10m is opgehoogd totdat de vrachtwagens de brug afzonderlijk zullen passeren. De grootst mogelijke slijtweg die de twee vrachtwagens bleken te veroorzaken vond plaats wanneer de vrachtwagens afzonderlijk van elkaar over de brug rijden. De grootste reductie van deze slijtweg bedraagt 57.5% en treedt op bij een constante volgafstand van 130m tussen de twee vrachtwagens. In deze bijlage zijn de resultaten gegeven voor twee vergelijkbare onderzoeken die uitgevoerd zijn met verschillende vrachtwagentypen.

Allereerst is gekeken naar de invloed van de volgafstand voor twee vrachtwagens van het type T11O3-75%. Als volgafstand is nu gestart met een constante waarde van 40m, welke met 20m is opgehoogd totdat de vrachtwagens de brug afzonderlijk zullen passeren. De resultaten hiervan zijn opgesomd in onderstaande tabel.

Volgafstand	Slijtwegen die optreden bij de opleggingen (mm)							
tussen twee vrachtwagens T11O3-75% (m)	w1a	w1b	w2a	w2b	w3a	w3b	w4a	w4b
40	4.2933	4.2961	0	0	7.4914	7.4863	3.8959	3.9044
60	3.7274	3.7312	0	0	6.4634	6.4564	3.3404	3.3476
80	3.4281	3.4296	0	0	5.6822	5.6771	2.9108	2.9162
100	3.3831	3.3837	0	0	4.8861	4.8820	2.7756	2.7783
120	3.7148	3.7151	0	0	4.1507	4.1446	3.4445	3.4412
140	4.2555	4.2562	0	0	5.8798	5.8727	4.3807	4.3780
160	4.7030	4.7037	0	0	7.4399	7.4329	4.9335	4.9349
180	5.1286	5.1293	0	0	8.3208	8.3147	5.1106	5.1168
200	5.3882	5.3889	0	0	8.9652	8.9590	5.1037	5.1099
220	5.5707	5.5714	0	0	9.4892	9.4820	5.1853	5.1924
240	5.7092	5.7100	0	0	9.8464	9.8382	5.1758	5.1850
260	5.7851	5.7860	0	0	9.9939	9.9849	5.0733	5.0845
280	5.7739	5.7750	0	0	9.8996	9.8908	4.9598	4.9700
300	5.6694	5.6708	0	0	9.5496	9.5413	5.2676	5.2705
320	5.5907	5.5917	0	0	9.1529	9.1450	5.4559	5.4596
340	5.7084	5.7094	0	0	9.7530	9.7441	5.4770	5.4831
360	5.8019	5.8028	0	0	10.0307	10.0218	5.4954	5.5014
380	5.8019	5.8028	0	0	10.0307	10.0218	5.4954	5.5014

Tabel 78: Slijtwegen veroorzaakt door twee vrachtwagens van het type T11O3-75% met verschillende volgafstanden

De grootste slijtwegen worden bereikt als de vrachtwagens individueel over de brug rijden, zonder daarbij gelijktijdig op de brug aanwezig te zijn (volgafstand ≥360m). De grootste reductie van deze slijtweg vindt plaats als de vrachtwagens met een constante volgafstand van 120m over de brug rijden. Voor oplegging w3b bedraagt de grootste slijtweg 10.0218mm en de kleinste slijtweg 4.1446mm. Hieruit kan worden geconcludeerd dat er een maximale reductie van de slijtweg op kan treden van:

$$s_{red} = \left(1 - \frac{4.1446}{10.0218}\right) \cdot 100\% = 58.64\%$$

Dit percentage is nagenoeg gelijk aan het percentage die werd gevonden bij twee vrachtwagens van het type V11-75%. Echter, dit zijn percentages voor situaties waarbij beide vrachtwagens van hetzelfde type zijn en dus een even grote massa hebben.

Voor de volledigheid is nog een situatie bekeken waarbij de twee vrachtwagens van een verschillend type zijn en waarvan de massa dus onderling van elkaar verschilt. Van de twee vrachtwagens is de voorste van het type T11O3-75% en de achterste van het type T11O3-25%. De massa van de vrachtwagens zijn achtereenvolgens 300kN en 530kN. Ook nu is gestart met een volgafstand van 40m, welke met 20m is opgehoogd totdat de vrachtwagens de brug afzonderlijk zullen passeren. De resultaten hiervan zijn opgesomd in onderstaande tabel.

Volgafstand	Slijtwegen die optreden bij de opleggingen (mm)							
tussen vrachtwagen T1103-75% en T1103-25% (m)	w1a	w1b	w2a	w2b	w3a	w3b	w4a	w4b
40	5.9931	5.9957	0	0	10.7024	10.6939	5.6098	5.6221
60	5.3592	5.3593	0	0	9.5874	9.5747	4.996	5.0059
80	4.7205	4.7212	0	0	8.7103	8.7027	4.4057	4.4136
100	4.1261	4.1274	0	0	7.9745	7.9673	3.9983	4.0015
120	4.7288	4.7278	0	0	7.7624	7.7532	4.8121	4.8045
140	5.5772	5.5776	0	0	9.1348	9.1277	6.1009	6.0961
160	6.3426	6.3435	0	0	10.8654	10.8582	6.8334	6.8352
180	6.9674	6.9683	0	0	11.8366	11.8285	7.0755	7.0826
200	7.3669	7.3677	0	0	12.5818	12.5729	7.0647	7.0759
220	7.6626	7.6635	0	0	13.2224	13.212	7.1054	7.1175
240	7.8841	7.8851	0	0	13.6629	13.6513	7.0758	7.0915
260	8.0005	8.0017	0	0	13.8393	13.827	6.9415	6.9597
280	7.9801	7.9817	0	0	13.7034	13.6911	6.8303	6.8443
300	7.8088	7.8109	0	0	13.2524	13.2406	7.2526	7.2562
320	7.6581	7.6595	0	0	12.9461	12.934	7.5547	7.559
340	7.877	7.8779	0	0	13.5435	13.5313	7.5836	7.592
360	8.0278	8.0292	0	0	13.8841	13.8718	7.6077	7.6162
380	8.0278	8.0292	0	0	13.8841	13.8718	7.6077	7.6162

Tabel 79: Slijtwegen veroorzaakt door twee vrachtwagens, met de voorste vrachtwagen van hettype T1103-75% en de achterste van het type T1103-25%, met verschillende volgafstanden

In deze situatie bedraagt de grootste slijtweg van oplegging w3b 13.8718mm en de kleinste slijtweg 7.7532mm. Hieruit kan worden geconcludeerd dat er een maximale reductie van de slijtweg op kan treden van:

$$s_{red} = \left(1 - \frac{7.7532}{13.8718}\right) \cdot 100\% = 44.11\%$$

De massa van de vrachtwagens blijkt dus invloed te hebben op de mate van reductie van de slijtweg. Bij de omgekeerde situatie, met de zwaarste vrachtwagen T11O3-25% voor en de lichtere vrachtwagen T11O3-75% daarachter, worden de onderstaande resultaten gevonden.

Volgafstand	Slijtwegen die optreden bij de opleggingen (mm)								
tussen vrachtwagen T1103-25% en T1103-75% (m)	w1a	w1b	w2a	w2b	w3a	w3b	w4a	w4b	
40	6.2948	6.2980	0	0	10.816	10.8069	5.6413	5.6550	
60	5.7434	5.7473	0	0	9.6743	9.6666	5.0520	5.0624	
80	5.5215	5.5238	0	0	8.7457	8.7404	4.7177	4.7243	
100	5.5611	5.5620	0	0	7.9667	7.9596	4.7192	4.7235	
120	5.8861	5.8871	0	0	7.6720	7.6668	5.3099	5.3099	
140	6.3996	6.4006	0	0	8.9831	8.9760	6.2968	6.2960	
160	6.8462	6.8473	0	0	10.7665	10.7574	6.9374	6.9408	
180	7.3039	7.3050	0	0	11.7665	11.7547	7.1447	7.1529	
200	7.5874	7.5885	0	0	12.5288	12.5184	7.1948	7.2026	
220	7.7781	7.7792	0	0	13.1823	13.1725	7.2955	7.3048	
240	7.9251	7.9263	0	0	13.6393	13.6280	7.2870	7.2989	
260	8.0094	8.0106	0	0	13.8388	13.8263	7.1781	7.1920	
280	8.0001	8.0015	0	0	13.7248	13.7124	7.0364	7.0484	
300	7.8919	7.8937	0	0	13.2900	13.2786	7.3529	7.3582	
320	7.8164	7.8178	0	0	12.9266	12.9158	7.5620	7.5679	
340	7.9342	7.9354	0	0	13.5024	13.4902	7.5808	7.5893	
360	8.0276	8.0289	0	0	13.8830	13.8707	7.6069	7.6153	
380	8.0276	8.0289	0	0	13.8830	13.8707	7.6069	7.6153	

Tabel 80: Slijtwegen veroorzaakt door twee vrachtwagens, met de voorste vrachtwagen van het type T1103-25% en de achterste van het type T1103-75%, met verschillende volgafstanden

In deze situatie bedraagt de grootste slijtweg van oplegging w3b 13.8707mm en de kleinste slijtweg 7.6668mm. Hieruit kan worden geconcludeerd dat er een maximale reductie van de slijtweg op kan treden van:

$$s_{red} = \left(1 - \frac{7.6668}{13.8707}\right) \cdot 100\% = 44.73\%$$

De volgorde van de vrachtwagens waarbij de vrachtwagens van een verschillend type zijn, beïnvloed de reductie van de slijtweg niet.

J2. Aantal vrachtwagens

In paragraaf 9.5 is onderzocht welke slijtwegen er optreden wanneer zich meerdere vrachtwagens tegelijkertijd op de brug bevinden, oftewel als vrachtwagens met een relatief korte volgafstand de brug passeren. Om inzicht te krijgen in de mate waarmee de slijtweg gereduceerd wordt, in vergelijking met de situatie wanneer de vrachtwagens één voor één de brug zouden passeren, zijn de reducties van de slijtwegen uitgedrukt in percentages.

De percentages in onderstaande tabel corresponderen met de slijtwegen die vermeld zijn in tabel 33 van paragraaf 9.5.

					Reductie van de slijtwegen in langsrichting (%)					
Aantal vrachtwagens	Volgafstand 1-2 (m	Volgafstand 2-3 (m	Volgafstand 3-4 (m	Volgafstand 4-5 (m	w1a	w1b	w3a	w3b	w4a	w4b
2	50	-	-	-	31.45	31.41	31.17	31.17	34.93	34.84
3	50	50	-	-	51.69	51.65	50.82	50.82	54.82	54.74
4	50	50	50	-	62.77	62.73	66.83	66.83	63.55	63.55
5	50	50	50	50	66.12	66.07	69.71	69.70	68.84	68.81
2	50	-	-	-	31.45	31.41	31.17	31.17	34.93	34.84
3	50	75	-	-	51.96	51.93	57.87	57.86	56.60	56.58
4	50	75	50	-	57.74	57.73	63.68	63.67	58.88	58.86
5	50	75	50	50	60.98	60.95	64.70	64.70	64.23	64.18
2	50	-	-	-	31.45	31.41	31.17	31.17	34.93	34.84
3	50	100	-	-	46.83	46.81	56.48	56.47	47.95	47.97
4	50	100	50	-	48.34	48.32	54.44	54.44	48.77	48.77
5	50	100	50	50	54.70	54.67	58.03	58.01	58.14	58.12
2	50	-	-	-	31.45	31.41	31.17	31.17	34.93	34.84
3	50	125	-	-	37.74	37.72	46.74	46.74	36.00	36.01
4	50	125	50	-	41.02	40.99	41.97	41.97	41.37	41.33
5	50	125	50	50	51.10	51.07	51.19	51.19	52.23	52.18
2	50	-	-	-	31.45	31.41	31.17	31.17	34.93	34.84
3	50	150	-	-	29.64	29.61	34.94	34.93	29.25	29.19
4	50	150	50	-	36.43	36.40	36.29	36.30	40.14	40.04
5	50	150	50	50	47.39	47.35	47.06	47.06	51.08	50.98
2	50	-	-	-	31.45	31.41	31.17	31.17	34.93	34.84
3	50	175	-	-	26.40	26.37	27.63	27.62	29.15	29.09
4	50	175	50	-	34.51	34.46	33.87	33.87	41.06	40.98
5	50	175	50	50	46.04	46.00	45.13	45.12	51.74	51.66
Gemiddelde reductie:		43.34	43.30	45.60	45.60	45.79	45.92			

Tabel 81: Reductie van de slijtwegen uitgedrukt in procenten, als gevolg van de aanwezigheid van meerdere vrachtwagens op de brug op hetzelfde tijdstip

De grootste reducties bedragen zo'n 69% voor de opleggingen van steunpunt 3 en 4. Deze reductie vindt plaats bij een constante volgafstand van 50m tussen 5 achtereenvolgende vrachtwagens. Ook is duidelijk te zien dat de reductie groter is naarmate er meer vrachtauto's tegelijkertijd over de brug rijden. De gemiddelde reductie van de slijtweg bij voorgaande simulaties bedraagt ongeveer 45%.

Om meer waarde te kunnen hechten aan de voorgaande conclusies zijn nog enkele slijtwegen bepaald voor situaties met oplopende volgafstanden, zoals vermeld in paragraaf 9.5 (tabel 34). De bijbehorende percentages voor de reductie van de slijtwegen zijn vermeld in de volgende tabel.

				Reductie van de slijtwegen in langsrichting (%)					
Aantal vrachtwagens	Volgafstand 1-2 (m)	Volgafstand 2-3 (m)	Volgafstand 3-4 (m)	w1a	w1b	w3a	w3b	w4a	w4b
2	80	-	-	40.91	40.89	43.33	43.33	47.00	46.96
3	80	80	-	53.79	53.78	60.51	60.50	54.36	54.39
4	80	80	80	57.04	57.02	64.04	64.03	61.85	61.82
2	90	-	-	41.91	41.90	47.27	47.27	48.90	48.88
3	90	90	-	51.80	51.80	59.14	59.14	56.98	56.95
4	90	90	90	57.16	57.15	66.49	66.50	62.71	62.73
2	100	-	-	41.68	41.68	51.27	51.27	49.46	49.47
3	100	100	-	50.65	50.66	59.16	59.14	60.58	60.55
4	100	100	100	56.57	56.58	66.30	66.28	64.22	64.20
2	110	-	-	39.85	39.86	55.28	55.28	46.62	46.71
3	110	110	-	47.77	47.79	61.57	61.56	59.73	59.76
4	110	110	110	51.74	51.76	64.71	64.69	66.29	66.28
2	120	-	-	35.96	35.97	58.60	58.63	37.29	37.41
3	120	120	-	43.09	43.10	64.97	64.98	51.39	51.52
4	120	120	120	46.66	46.67	68.15	68.16	58.44	58.57
Ge	emidde	lde red	uctie:	47.77	47.77	59.39	59.38	55.06	55.08

Tabel 82: Reductie van de slijtwegen uitgedrukt in procenten, als gevolg van de aanwezigheid van meerdere vrachtwagens op de brug op hetzelfde tijdstip

Ook in dit geval worden grote reducties van de slijtweg geconstateerd, 68% voor de opleggingen van steunpunt 3 respectievelijk 66% voor de opleggingen van steunpunt 4. Wederom is duidelijk te zien dat de reductie groter is naarmate er meer vrachtauto's tegelijkertijd over de brug rijden. De gemiddelde reductie van de slijtweg per oplegging varieert nu van 47.77% voor w1a tot 59.39 voor w3a.

K. DYNAMISCH VS. STATISCH

K1. Verplaatsing in langsrichting







K2. Oplegreactie



L. THERMISCHE INVLOEDEN

L1. Liggermodel 1

In figuur 95 is een over drie steunpunten doorgaande voorgespannen plaatbrug geschematiseerd [14]. De overspanning AB en BC hebben een lengte L = 30m, de hoogte van de plaat is constant en bedraagt 1m. Onder invloed van zonbestraling treedt in de plaat een temperatuurstijging op die lineair over de hoogte verloopt. Aan de bovenzijde bedraagt deze temperatuurstijging $\Delta T = 15^{\circ}C$, aan de onderzijde blijft de temperatuur van $0^{\circ}C$ ongewijzigd.



Figuur 95: Liggermodel 1 als schematisering van een doorgaande voorgespannen plaatbrug

Voor het materiaal van de plaatbrug geldt:

- $\begin{array}{ll} & \text{lineaire uitzettingscoëfficiënt} & \alpha = 1 \cdot 10^{-5} \, {}^{\circ}\text{C}^{-1} \\ & \text{elasticiteitsmodulus} & \text{E} = 30 \cdot 10^{3} \text{N/mm}^{2} \end{array}$
- eigen gewicht $\rho = 25 \text{kN/m}^3$

Voor een 1m brede strook van de plaatbrug dienen de oplegreacties en vervorming tengevolge van alleen de zonbestraling te worden bepaald.

L2. Liggermodel 1 analytisch

Om de ligger vrij te laten vervormen wordt deze statisch bepaald gemaakt door boven het middensteunpunt een scharnier aan te brengen (figuur 96).

De kromming die bij vrije vervorming optreedt als gevolg van de thermische invloed is gelijk aan:

$$\kappa^{\mathsf{T}} = \alpha \cdot \frac{\Delta T}{h} = 1 \cdot 10^{-5} \cdot \frac{15}{1} = 150 \cdot 10^{-6} \, \text{m}^{-1}$$

Om de staafeinden weer op elkaar aan te sluiten is in B een momentenpaar nodig. Dit steunpuntsmoment M is de statisch onbepaalde.



Figuur 96: Kromming door temperatuur bij vrije vervorming en kromming door steunpuntsmoment

Voor de rotaties in het middensteunpunt tengevolge kromming door temperatuur κ^{T} bij vrije vervorming en kromming door steunpuntmoment κ^{M} geldt:

$$\Phi_{B}^{AB} = -\frac{1}{2}L\kappa^{T} + \frac{ML}{3EI}$$
$$\Phi_{B}^{BC} = +\frac{1}{2}L\kappa^{T} - \frac{ML}{3EI}$$

Uit de aansluitvoorwaarde $\Phi_{B}^{AB} = \Phi_{B}^{BC}$ volgt:

 $M = \frac{3}{2}EI\kappa^{T} = \frac{3}{2}E \cdot \frac{1}{12}bh^{3} \cdot \kappa^{T} = \frac{3}{24}E \cdot bh^{3} \cdot \kappa^{T} = \frac{3}{24} \cdot 30 \cdot 10^{6} \cdot 1 \cdot 1^{3} \cdot 150 \cdot 10^{-6} = 562.5kNm$

Hiermee is de momentenlijn tengevolge van de zonbestraling bepaald. De dwarskrachtenlijn en oplegreacties kunnen worden bepaald uit de helling van de momentenlijn (figuur 97).



Figuur 97: Momentenlijn, dwarskrachtenlijn en oplegreacties

De kromming van de brug wordt samen gesteld uit kromming door temperatuur bij vrije vervorming κ^{T} en kromming door het steunpuntmoment κ^{M} . Voor beide aandelen kan een aparte krommingslijn worden getekend, uitgedrukt in κ^{T} .

Uit de aansluitvoorwaarde $\phi_{B}^{AB} = \phi_{B}^{BC}$ volgde immers $M = \frac{3}{2} El\kappa^{T}$, zodat geldt:

 $\kappa^{\mathsf{M}} = \frac{\mathsf{M}}{\mathsf{EI}} = \frac{3\mathsf{EI}\kappa^{\mathsf{T}}}{2\mathsf{EI}} = \frac{3}{2}\kappa^{\mathsf{T}}$

De krommingslijn voor de afzonderlijke aandelen, temperatuur bij vrije vervorming en steunpuntsmoment, en de gezamenlijke bijdrage kunnen worden getekend (figuur 98). De gezamenlijke bijdrage wil zeggen, de krommingslijn door temperatuur zonder vrije vervorming. Kromming tengevolge van het eigen gewicht van de brug is hierbij buiten beschouwing gelaten.



Figuur 98: Krommingslijnen voor temperatuur bij vrije vervorming κ^{T} , voor steunpuntsmoment κ^{M} , voor temperatuur zonder vrije vervorming en de vervormingslijn van de ligger.

In de voorgaande figuur is op basis van de krommingslijn, veroorzaakt door temperatuur zonder vrije vervorming, de vervorming van de brug geschetst. De buigpunten komen overeen met de plaats waar de kromming gelijk is aan nul.

L3. Liggermodel 1 Midas CIVIL

Met behulp van Midas CIVIL zijn de oplegreacties en de vervorming van de ligger nogmaals bepaald, om inzicht te krijgen in het modelleren van thermische invloeden en de nauwkeurigheid van de resultaten. De brug is gemodelleerd als een 3D ligger, opgebouwd uit volume elementen, met een doorsnede van 1mx1m. Aan de elementen zijn de materiaaleigenschappen (lineaire uitzettingscoëfficiënt, elasticiteitsmodulus en eigen gewicht) toegewezen. Ieder steunpunt is vertegenwoordigd door vijf knopen met randvoorwaarden. In figuur 99 is het vooraanzicht van het model van de ligger te zien. De volume elementen hebben een afmeting van $1x0.25x0.25m^3$. In het middensteunpunt is alleen rotatie om de y-as mogelijk, in het linker en rechter steunpunt is rotatie om de y-as en translatie in x en y richting toegestaan.



Figuur 99: Vooraanzicht model van de ligger

Thermische invloeden worden in rekening gebracht door temperatuurverschillen ΔT aan knopen toe te wijzen. Aangezien de temperatuur lineair over de hoogte verloopt wordt aan iedere knoop, afhankelijk van de hoogte binnen de doorsnede, een temperatuurverschil toegewezen. In figuur 100 is het zijaanzicht van het model gegeven, waarin een rood bolletje een temperatuurverschil in een knoop voorstelt.





Met het model zoals hiervoor beschreven zijn de oplegreacties bepaald, als gevolg van het temperatuurverschil aan de bovenzijde en onderzijde van de brug. De oplegreacties in x, y en z richting van de vijf knopen per steunpunt zijn in tabel 83 opgesomd. Tevens is de oplegreactie in z richting per steunpunt gegeven.

Het vergelijken van de oplegreacties van tabel 83 die zijn bepaald met Midas CIVII en de oplegreacties van figuur 97 die analytische zijn bepaald, laat zien dat het op deze wijze modelleren van temperatuurverschillen nauwkeurige resultaten oplevert.

Steunpunt	Кпоор	Ор	Oplegreactie Fz per		
		Fx (kN)	Fy (kN)	Fz (kN)	steunpunt (kN)
	10001	0.000000	0.000000	31.884716	
	10002	0.000000	0.000000	-6.486007	
А	10003	0.000000	0.000000	-32.054481	18.742937
	10004	0.000000	0.000000	-6.486007	
	10005	0.000000	0.000000	31.884716	
	10006	0.000000	-26.913488	74.296442	
	10007	0.000000	-37.839459	-40.478918	
В	10008	0.000000	0.000000	-105.120924	-37.485876
	10009	-0.000000	37.839459	-40.478918	
	10010	-0.000000	26.913488	74.296442	
	10011	0.000000	0.000000	31.884716	
	10012	0.000000	0.000000	-6.486007	
С	10013	0.000000	0.000000	-32.054481	18.742937
	10014	0.000000	0.000000	-6.486007	
	10015	0.000000	0.000000	31.884716	

Tabel 83: Reactiekrachten als gevolg van het temperatuurverschil

De vervorming als gevolg van het temperatuurverschil is gegeven in figuur 101. Ook het verloop van de vervorming en de plaats van de buigpunten die volgen uit Midas CIVIL komen overeen met de eerder gevonden analytische resultaten.



Figuur 101: Vervorming van de ligger als gevolg van het temperatuurverschil

L4. Liggermodel 2

De doorsnede van liggermodel 1 heeft een vierkant doorsnede waarbij de temperatuurinvloed lineair over de gehele doorsnede van de koker verloopt. Bij de Dintelhavenbrug hebben we te maken met een situatie waarbij de verticale temperatuurverschillen zich beperken tot de bovenflens van de doorsnede. De elementen in de bovenflens dienen een hoogte te hebben, zodat het lineaire temperatuurverloop in rekening kan worden gebracht. Daarnaast kan worden afgevraagd, wat het opdelen van de bovenflens in meerdere elementen met ongebruikelijk afmetingen voor invloed heeft op de resultaten voor verplaatsingen en oplegreacties. Om dit te onderzoeken wordt een eenvoudige T ligger beschouwd [15].

Op de T ligger (figuur 102) wordt slechts een temperatuurverschil aangebracht in de bovenflens. Voor de ligger geldt een lineaire uitzettingscoëfficiënt α , een elasticiteitsmodulus van $3/4 \cdot E$ voor de bovenflens en E voor het lijf. De verticale verplaatsing in punt B dient te worden bepaald.



Figuur 102: Liggermodel 2, uitkragende T ligger met een temperatuurinvloed in de bovenflens

De waarden voor de symbolen zijn gelijk gesteld aan: a = 250mm E = $3.93 \cdot 10^7 \text{kN/m}^2$ $\alpha = 1 \cdot 10^{-5} \, ^\circ\text{C}^{-1}$ T = 10°C L = 20m

L5. Liggermodel 2 analytisch

De constructie is statisch bepaald en kan vrij vervormen. Om de verplaatsing van punt B door vrije vervorming te kunnen bepalen, is het noodzakelijk de ligging van het NC het temperatuurverloop over de flensdikte en de verticale buigstijfheid van de doorsnede vast te stellen.

De ligging van het NC ten opzichte van de bovenrand van de doorsnede:

$$z_{NC} = \frac{a \cdot (EA)_{flens} + 5a \cdot (EA)_{lijf}}{(EA)_{flens} + (EA)_{lijf}}$$
$$= \frac{a \cdot \frac{3}{4}E \cdot 2a \cdot 16a + 5a \cdot E \cdot 6a \cdot 4a}{\frac{3}{4}E \cdot 2a \cdot 16a + E \cdot 6a \cdot 4a} = 3a$$



Figuur 103: Ligging van het NC

Het temperatuurverloop over de flensdikte:

$$T(z) = -\frac{1}{2}T \cdot (1 + \frac{z}{a})$$

Verticale buigstijfheid van de doorsnede:

$$EI_{zz} = (EI)_{flens} + (EI)_{lijf}$$

= $\left(\frac{3}{4}E \cdot \left(\frac{1}{12} \cdot 16a \cdot (2a)^3 + 16a \cdot 2a \cdot (2a)^2\right)\right) + \left(E \cdot \left(\frac{1}{12} \cdot 4a \cdot (6a)^3 + 4a \cdot 6a \cdot (2a)^2\right)\right)$
= 104Ea⁴ + 168Ea⁴ = 272Ea⁴

Wegens symmetrie zal de ligger niet in y richting krommen ($\kappa_z^T = 0$) en zullen de hoofdrichtingen samenvallen met het yz-assenstelsel door het gevonden NC. Dit betekent dat de buiging om de y-as en de buiging om de z-as ontkoppeld kunnen worden. De kromming in verticale richting is dan gelijk aan:

$$\kappa_{z}^{T} = \int_{A} z \cdot \alpha \cdot E(y, z) \cdot T(y, z) dA / EI_{zz} = \frac{1}{EI_{zz}} \int_{z} z \cdot \alpha \cdot E(y, z) \cdot T(y, z) \cdot b \cdot dz$$
$$= \frac{1}{EI_{zz}} \int_{-3a}^{-a} z \cdot \alpha \cdot \frac{3}{4} E \cdot \left(-\frac{1}{2} T \cdot (1 + \frac{z}{a}) \right) \cdot (16a) dz = -\frac{7}{68} \frac{\alpha T}{a} \quad (\text{berekendmetMaple})$$

De kromming is gelijk aan de afgeleiden van de rotatie, zodat de rotatie:

$$\phi = \int_{0}^{L} \kappa_{z}^{T} dz = \frac{7}{68} \frac{\alpha T}{a} \cdot L$$

De verplaatsing in B door vrije vervorming is hiermee gelijk aan:

 $u_{\text{vrijevervorming}} = \phi \cdot \frac{1}{2}L = \frac{7}{136} \frac{\alpha T}{a} \cdot L^2 = \frac{7}{136} \frac{1 \cdot 10^{-5} \cdot 10}{250} \cdot 20000^2 = 8.235294 \text{mm}$

L6. Liggermodel 2 Midas CIVIL

De verplaatsing in punt B van de statisch bepaalde ligger, als gevolg van de lineaire temperatuurverandering in de bovenflens, kan ook worden bepaald met Midas CIVIL. Voor het in rekening brengen van het lineaire temperatuurverloop is het voldoende om de bovenflens uit één element over de hoogte te laten bestaan. Om te onderzoeken wat de invloed is van het aantal elementen over de hoogte van de bovenflens, is de bovenflens vervolgens opgedeeld in twee en vier elementen boven elkaar (figuur 104).



Figuur 104: Zijaanzicht T ligger met geen opdeling (links), in tweeën opgedeelde (midden) en in vieren opgedeelde (rechts) bovenflens

De rode bolletjes in de voorgaande figuur zijn knoop temperaturen. De bovenste knoop van de flens heeft een temperatuurverschil van 10°C en de onderste knoop houdt een constante temperatuur. Afhankelijk van de opdeling is aan de tussengelegen knopen een lineaire geïnterpoleerd temperatuurverschil toegewezen. In tabel 84 zijn de verplaatsingen van punt B gegeven die met de modellen met verschillende opdelingen van de bovenflens worden gevonden.

Opdeling bovenflens	Verplaatsing punt B (mm)
0	8.228957072
2	8.225701017
4	8.210211693

Tabel 84: Verplaatsing punt B

De verplaatsing die optreedt in punt B blijkt nauwelijks beïnvloed te worden door het aantal element over de hoogte van de bovenflens. De verplaatsingen komen op één tot tweehonderdste na overeen met de analytische oplossing. De verplaatsingencontour van de T ligger zonder opdeling van de bovenflens is gegeven in figuur 105. Voor de modellen waarvan de bovenflens is opgedeeld, geldt een identiek verplaatsingencontour.



Figuur 105: Verplaatsingencontour T ligger veroorzaakt door temperatuurbelasting

Uit dit eenvoudige liggermodel volgt dat een opdeling van de elementen die aan temperatuurverschillen onderhevig zijn, geen invloed heeft op de resultaten. Midas CIVII past binnen een element zelf lineaire interpolatie van het temperatuurverschil toe.

REFERENTIES

Literatuur

- [1] A. Otte, *Proposal for modified Fatigue Load Model based on EN 1991-2*, MSc Thesis Civiele Techniek, Technische Universiteit Delft, juli 2009
- [2] J.P. Veldhoven, A.M.C. Heemskerk, G.Chr.Bouquet, *Rapport brugopleggingen*, Rijkswaterstaat Directie Bruggen, februari 1984
- [3] N.A. Fouad, *Temperature loading of concrete bridges due to environmental thermal actions*, Leibniz University of Hannover
- [4] O. Larsson, *Modelling of temperature profiles in a concrete slab under climatic exposure,* Lund University, Sweden, 2009
- [5] Maurer Söhne, MAURER MSM® Sliding Bearings, Duitsland
- [6] Indrajit Chowdhury, Shambhu P. Dasgupta, *Computation of Rayleigh Damping Coefficients for Large Systems*, Petrofac International Limited and Indian Institute of Technology, India
- [7] Computers & Structures, Inc., *Ritz Analysis vs. Eigen Analysis: Vertical Seismic Analysis*, CSI Publication
- [8] A.E. Aktan, S.K. Ciloglu, K.A. Grimmelsman, Q.Pan, F.N. Catbas, *Opportunities* and challenges in health monitoring of constructed systems by modal analysis, Affiliation Drexel University, Intelligent Infrastructure Institute, Philadelphia, PA, USA and University of Central Florida, Orlando, FL, USA
- [9] Kazuhiko Kawashima, Shigeki Unjoh, *Damping characteristics of cable-stayed bridges associated with energy dissipation at movable supports*, Japan Society of CIVIL Engineers, April 1989
- [10] John Stanton, Friction Coefficients for Stainless Steel (PTFE) Teflon Bearings, Department of CIVIL Engineering University of Washington
- [11] Fayçal Ikhouane, Víctor Mañosa, José Rodellar, *Dynamic properties of the hysteretic Bouc-Wen model*, Departament de Matemàtica Aplicada III, Universitat Politècnica de Catalunya, Spain, 2 September 2006
- [12] Daniel M. Fenz and Michael Constantinou, *Modeling Triple Friction Pendulum Bearings for Response-History Analysis*, Earthquake Engineering Research Institute, November 2008

- [13] Helmut Eggert, Wolfgang Kauschke, *Structural Bearings*, Ernst & Sohn, Berlin, Duitsland 2002
- [14] Coenraad Hartsuijker, Hans Welleman, *Toegepaste Mechanica Deel 3: Statisch* onbepaalde constructies en bezwijkanalyse, Academic Service, 2004
- [15] Coenraad Hartsuijker, Hans Welleman, *Constructiemechanica 4 CT3109, Module: Niet-symmetrische en inhomogene doorsneden*, TU Delft, Januari 2008
- [16] Lei Gong, Moe S. Cheung, Computer Simulation of Dynamic Interactions Between Vehicle and Long Span Box Girder Bridges, Department of CIVIL Engineering, University of Ottawa, Ottawa, Canada, Oktober 2008
- [17] M.C. Constantinou, I. Kalpakidis, A. Filiatrault, R.A. Ecker Lay, *LRFD-Based Analysis and Design Procedures for Bridge Bearings and Seismic Isolators*, University at Buffalo, New York, Draft version, September 2010

Voorschriften

NEN-EN 1991-1-5:2003: Eurocode 1: Belastingen op constructies – Deel 1-5: Algemene belastingen – Thermische belasting

NEN-EN 1991-1-5:2003/NB:2009 Ontw: Nationale bijlage bij Eurocode 1: Belastingen op constructies – Deel 1-5: Algemene belastingen – Thermische belasting

NEN-EN 1991-2:2003: Eurocode 1: Belastingen op constructies – Deel 2: Verkeersbelasting op bruggen

NEN-EN 1337-2:2004: Opleggingen voor bouwkundige en civieltechnische toepassingen – Deel 2: Glijdelen

NEN-EN 1337-5:2005: Opleggingen voor bouwkundige en civieltechnische toepassingen – Deel 5: Potopleggingen